



Roope Partamies

Poraus- ja panostussuunnittelun merkitys louhinnan aiheuttamien typpipäästöjen vähentämiseksi Kittilän kaivoksella

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 30.10.2017

Valvoja: Professori Mikael Rinne

Ohjaaja: DI Timo Halme

Tekijä Roope Partamies

Työn nimi Poraus- ja panostussuunnittelun merkitys louhinnan aiheuttamien typpipäästöjen vähentämiseksi Kittilän kaivoksella

Koulutusohjelma Rakenne- ja rakennustuotantotekniikka

Pää-/sivuaine European Mining Course

Koodi R3008

Työn valvoja Prof. Mikael Rinne

Työn ohjaaja(t) DI Timo Halme

Päivämäärä 30.10.2017

Sivumäärä 64

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Kittilän kaivos on vuoden 2016 malmin tuotantomääriltään Euroopan suurin maanalainen kultakaivos. Kaivoksen tuotantolouhinnassa käytetään elektronisia nalleja sekä räjähdysaineena Forcit Oy Ab valmistamaa Kemiitti 810 emulsioräjähdysainetta.

Tässä diplomityössä tutkittiin maanalaisesta tuotantolouhinnasta aiheutuvia malmiin jääneitä typpipäästöjä. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kuinka paljon räjähdysainetta jää reagoimatta louhosräjäytyksissä ja kuinka paljon louhe sisältää typpeä. Arvioitavina tekijöinä tutkittiin myös onko nousun tyypillä ja panostussukan käytöllä vaikutuksia louhinnan aiheuttamiin typpipäästöihin.

Työn kirjallisuusosiossa esitellään louhinnasta aiheutuvan typen kulkeutuminen räjähdysaineesta ympäristöön ja räjähteen epätäydelliseen reagoimiseen oleellisesti vaikuttavat tekijät maanalaisessa tuotantolouhinnassa. Tämän lisäksi Kittilän kaivoksella käytetyt poraus- ja panostussuunnittelun pääperiaatteet esitellään louhostutkimusta pohjustavana tietona.

Kokeellisessa tutkimuksessa kolmen testilouhoksen louhosräjäytyksistä kerätyille mobiilimurskatuille louhenäytteille suoritettiin laboratoriossa toteutetut liuotusanalyysit typpipitoisuuden selville saamiseksi. Virhelähteiden havaitsemiseksi louhoksien porarei'ille suoritettiin reikäsuoritusmittaukset, räjäytyksien tärinät mitattiin sekä louhituista tiloista laadittiin laserskannausmallit. Myös porauksen ja panostuksen raportoinnit sekä räjähdysaineen kaasuuntuminen dokumentoitiin.

Kokeellisen tutkimuksen liuotusanalyysien mukaan testilouhoksien keskimääräisen louheen typpipitoisuus oli 38,0 g/t ja todellisella ominaispanostusasteella laskettaessa noin 30 % räjähdysaineesta jäi reagoimatta. Tutkimuksessa toteutettujen näytteenottomenettelmien raekoon valikoitumisen vuoksi tutkimuksessa saatujen tuloksien voidaan pitää liioittelevina, mutta louhoksien keskinäistä vertailua varten vähintään suuntaa antavina. Tuloksien perusteella voidaan päätellä että kiertoporattuja avausreikiä hyödyntävällä nousun tyypillä saavutetaan alhaisemmat louhinnan aiheuttamat typpipäästöt kuin tavanomaisella pitkäreikänousulla. Panostussukan käytön vaikutuksista ei tutkimuksessa saatu riittävän selkeitä tuloksia, jotta sen merkityksestä typpipäästöihin voitaisiin tehdä johtopäätöksiä. Panostussukan voi silti nähdä panostusta hyödyttävänä apuvälineenä es-tämässä räjähdysaineen vuotamisen porareiän mahdollisiin rakoihin heikkousvyöhykkeillä.

Avainsanat Maanalainen louhinta, Louhosnousu, panostussukka, typpipäästöt, kaivos, emulsioräjähteet

Author Roope Partamies		
Title of thesis Significance of Drill & Blast Planning to Decrease Nitrogen Residues of Underground Mining in Kittilä Mine		
Degree programme Construction and Building Technology		
Major/minor European Mining Course		Code R3008
Thesis supervisor Prof. Mikael Rinne		
Thesis advisor(s) M. Sc Timo Halme		
Date 30.10.2017	Number of pages 64	Language Finnish

Abstract

Kittilä Mine is the largest underground gold mine in Europe as measured by the ore production in year 2016. The stoping method mainly used at the mine is transverse bench stoping with delayed backfill. In Kittilä mine, electronic detonators and Kemiitti 810 bulk-emulsion explosives are used in the production.

This Master's Thesis focused on nitrogen residues in blasted ore caused by underground stoping. The objective of the study was to find out how much explosives are not detonated correctly and how much nitrogen appear in blasted ore. In addition the target was to find out if the opening method of the stope and the utilization of blasting socks affects the levels of nitrogen residues.

The literature review represents the fractions and flows of nitrogen from explosives to the environment and demonstrates the main factors influencing the incident of the detonation. Also the principles of drill & blast planning used at the mine is presented for prefacing the experimental part of the study.

In the experimental study, dissolution analyses were performed for crushed ore samples from three individual stopes. To observe sources of errors, drill hole deviations, blasting vibrations and laser scans of the blasted stopes were implemented. Furthermore drilling and blasting reports along with sensitizing tests of the explosives were documented.

According to the results of dissolution analyses, the average total nitrogen content of the test stopes was 38 g/t and approximately 30 % of used explosives detonated incorrectly. However, because of the occurred decreasing of particle sizes due to sampling methods, the results can be considered overestimating the nitrogen amounts. Nevertheless the results are approximate for evaluating factors of the study.

Concluding the study, the opening method with raise bored opening holes shows potential to decrease nitrogen residues of blasting compared to the conventional long hole raise. The results of utilizing blasting socks were insufficiently reliable to show their connection to nitrogen residues. Blasting socks though can be considered as auxiliary blasting equipment to prevent the spillage of explosives in drill holes located in fracture zones.

Keywords Underground mining, drilling, blasting sock, nitrogen residues, mining, emulsion explosives

Alkusanat

Diplomityön aihetta tarjottiin minulle ollessani kesätöissä poraus- ja panostussuunnittelutehtävissä Kittilän kaivoksella, Agnico Eagle Finland Oy:lla. Aihe oli mielenkiintoinen, työtehtäviini liittyvä sekä ympäristön kannalta mahdollisesti merkittävää tietoa tuottava.

Työn ja aiheen saamisen kannalta kiitän kaivoksella työtä ohjannutta käyttöinsinööriä ja räjäytystyönjohtajaa Mika Hannulaa. Aikatauluista huolimatta sain häneltä tukea ja hyviä ohjeita työn toteutukseen liittyen.

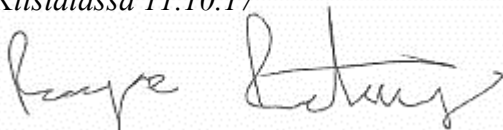
Diplomityön ohjausryhmästä kiitän virallista työn ohjaajaa DI Timo Halmetta mittauksien avustamisesta kaivoksella, hyvistä ja pohdiskelevista keskusteluista sekä arvokkaista neuvoista tutkimuksen suunnittelun ja laskelmien osalta. Ohjausryhmästä kiitän myös DI Tuomo Hännistä selkeistä ja rakentavista kommentteista työn kokonaisuuden kannalta.

Erityisen suuren kiitoksen ansaitsee työn valvoja Professori Mikael Rinne, ei ainoastaan työn valvomisesta tai kommentoinnista, vaan haasteiden, mahdollisuuksien ja tärkeiden pohdiskelujen tarjoamisesta koko opintojeni suhteen. Mikään ei ole arvokkaampaa kuin taustalle annettavat ajatuksien siemenet, joista itse kasvatetaan muussakin elämässä merkitykselliset versot.

Lopuksi haluan kiittää kaivoksella poraus- ja panostussuunnittelua kanssani tehnyttä Teppo Suurosta toimistolla saaduista opeista, tuesta ja hyvästä ”tekemisen ilmapiiristä” kaivoksella.

Kiitos myös isälleni DI Jukka Partaselle tärkeistä neuvoista sekä henkisestä tuesta opiskeluvuosina 2010–2017.

Kiistalassa 11.10.17



Roope Partamies

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

Merkinnät

1	Johdanto	1
1.1	Tutkimuksen tavoitteet	2
1.2	Tutkimuskysymykset	2
1.3	Työn rakenne	3
1.4	Tutkimusmenetelmät	3
1.5	Kittilän kaivos	4
2	Louhinnasta aiheutuvat typpipäästöt	7
2.1	Tyypin kulkeutuminen louhinnassa	7
2.2	Emulsioräjähteet	10
2.3	Typpipäästöjen muodostumiseen vaikuttavat tekijät	16
2.3.1	Räjähteen liukeneminen	16
2.3.2	Kriittinen tiheys	17
2.3.3	Heikkousvyöhykkeet ja ruhjeisuus	17
2.3.4	Poraus ja suunnittelu	18
2.3.5	Panostustyö	18
2.4	Typpi ympäristössä	20
2.5	Typpipäästöistä laaditut tutkimukset	21
3	Maanalainen louhossuunnittelu	22
3.1	Louhintamenetelmät Kittilän kaivoksella	22
3.2	Louhosporauksen suunnittelu ja toteutus	23
3.2.1	Reikäkoko	23
3.2.2	Porareikien sijoittaminen	23
3.2.3	Louhosnousut	25
3.3	Louhospanostuksen suunnittelu ja toteutus	26
3.3.1	Räjäytysvaiheet	27
3.3.2	Panospituudet	28
3.3.3	Nallituksen suunnittelu	28
3.4	Tärinämittauksen hyödyntäminen louhinnassa	29
4	Louhostutkimus	31
4.1	Louhosten räjäytysvaiheet	32
4.2	Tutkimuslouhosten suunnittelu	33
4.2.1	Porauksen suunnittelu	33
4.2.2	Panostuksen suunnittelu	33
4.3	Reikäsuoritusmittaukset	34
4.4	Tärinämittaukset	36
4.5	Aineistonkeruumenetelmät ja vaiheistukset	37
4.5.1	Lastaus	37
4.5.2	Näytteiden varastointi ja mobiilimurskaus	38
4.5.3	Näytteiden valmistelu	40
4.6	Liutusanalyysit	42

5	Tulokset.....	43
5.1	Reikäsuoruuksmittaukset.....	43
5.2	Panostuksen toteutus	44
5.3	Tärinämittaukset.....	47
5.4	Laserskannaukset.....	50
5.5	Liuotusanalyysit	51
5.5.1	Louheen tyypipitoisuus	51
5.5.2	Reagoimattomien räjähdysaineiden laskelmat.....	53
6	Tuloksien käsittely	54
6.1	Reagoimaton räjähdysaine ja louheen tyypipitoisuus	54
6.2	Menetelmien virhelähteiden arviointi.....	59
7	Johtopäätökset.....	61
8	Lähdeluettelo.....	63
9	Liitteet	
	Liite 1(1/3). 450L173_1 Tärinämittaukset.....	
	Liite 1(2/3). 325L165_1 Tärinämittaukset.....	
	Liite 1(3/3). 375L162_1 Tärinämittaukset.....	
	Liite 2(1/3). Reikäsuoruuksmittaukset 325L165_1	
	Liite 2(2/3). Reikäsuoruuksmittaukset 375L162_1	
	Liite 2(3/3). Reikäsuoruuksmittaukset: 450L173_1	
	Liite 3(1/3). Laserskannaukset 325L165_1.....	
	Liite 3(2/3). Laserskannaukset 375L162_1.....	
	Liite 3(3/3). Laserskannaukset 450L173_1.....	
	Liite 4(1/3). Liuotusanalyysit: Kokonaistyyppi	
	Liite 4 (2/3). Liuotusanalyysit: Nitraatti- ja nitriittityppi.....	
	Liite 4 (3/3). Liuotusanalyysit: Ammoniumtyppi	
	Liite 5. Esimerkki poraraportti.....	
	Liite 6. Esimerkki panostusraportti	
	Liite 7. 325L165_1 latvaräjäytyksen lastaus.....	

Merkinnät

A	Amplitudi
a	Siirtymäaika
AN (NH_4NO_3)	Ammoniumnitraatti
ANFO	Ammoniumnitraatti-polttoöljy räjähdysaine
°C	Celsius-aste
CaNO_3	Kalsiumnitraatti
CO_2	Hiilidioksidi
f	Frekvenssi
g	Massa
H_2O	Vesi
Kok-N	Kokonaistyyppi
L_1, L_2, L_3	Louhosleikkauksen numerointi
L/S	Neste-kiintoainessuhde (l/kg)
m	massa (kg)
Mkok-N	Näytteen sisältämä typen määrä
mm	millimetri
Mr	Räjähteen massa näytteessä
ms	Millisekunti
N_2	Typpikaasu
NaNO_3	Natriumnitraatti
NH_4^+	Ammoniumioni
NO	Typpimonoksidi
NO_2^-	Nitriittityppi
NO_3^-	Nitraattityppi
NTP	Normaalilämpötila ja -paine
OB	Happitase
OP	Ominaispanostusaste (kg/m ³)
PRN	Pitkäreikänousu
RQD	Kallion laatuluokitus (Rock Quality Degree)
T	Tonni
TRB	Kiertoporaava nousupora/nousu
U_1, U_2, U_3	Osauuton numerointi
V	Näytepullon tilavuus (l)
v	Heilahdusnopeus (mm/s)
YVA	Ympäristövaikutusten arviointi

1 Johdanto

Teollisuuden ympäristövaikutusten huomiointi on kasvanut kaikilla teollisuudenaloilla ja teollisuuden tuotannolle asetetaan yhä tarkempia ympäristöasioihin liittyviä vaatimuksia. Ympäristövaatimuksien ja kestävä kehityksen periaatteiden hyödyntäminen teollisuuden tuotannossa vaikuttavat erityisesti kansainvälisesti operoituun ja ympäristövaikutuksiltaan suureen kaivosteollisuuteen.

Kaivostoiminnasta aiheutuvat ympäristövaikutukset vaihtelevat kaivoksen tyypin ja laajuuden mukaan. Maanalaisen kaivoksen merkittävimmät vaikutukset luonnonympäristöön muodostuvat vesiin kohdistuvista muutoksista, mitkä johtuvat kaivoksen tuotantovaiheessa malmin louhinnasta, kaivoksen kuivanapitovesistä, malmin prosessoinnista, sivukiven varastoinnista sekä vesienohjausjärjestelyistä. Laadulliset vaikutukset kaivoksen ympäröimiin vesiin johtuvat esimerkiksi sulfaattipäästöjen osalta sulfidi-pitoisesta malmistä sekä typen osalta louhinnassa käytetyistä räjähteistä ja prosessoinnissa käytetyistä kemikaaleista. (Kauppila, ym. 2015)

Kiven irrottaminen ja kappalekoon pienentäminen on kustannustehokkainta suorittaa räjäyttämällä, mistä syystä toteutuneet ominaispanostusasteet voivat olla varmistelun vuoksi ylimitoitettuja, mutta samasta syystä johtavat reagoimatta jääneiden räjähdysainesten osuuksien kasvuun. (Paalumäki;Lappalainen ja Hakapää 2015)

Louhinnan aiheuttamat typpipäästöt syntyvät palamattomien räjähteiden jäämisestä louhittavaan kivimateriaaliin ja liukenemalla edelleen kaivoksen kuivana. Louhinnassa palamattomaksi jääneet räjähteet eivät ainoastaan kasvata louhinnan aiheuttamaa ympäristökuormaa, vaan muodostavat kaivoksessa toimiville työntekijöille turvallisuusriskin sekä laskevat louhinnan kustannustehokkuutta.

Tutkimuksissa on osoitettu että palamattomien räjähteiden määrää on mahdollista vähentää sekä poraus- ja panostussuunnittelua että panostuksessa käytettäviä työmenetelmiä kehittämällä. (Revey 1996)

1.1 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena on arvioida poraus- ja panostussuunnittelun merkitystä palamattomaksi jääneiden räjähteiden määrään maanalaisessa tuotantolouhinnassa Kittilän kaivoksella. Työssä tutkitaan onko louhoksien porausmenetelmillä sekä panostettaessa porareikiin asennettavalla muovisukalla vaikutuksia palamattomien räjähteiden syntymisessä. Jotta palamattomien räjähteiden määrää on mahdollista arvioida tutkimuksessa, mitataan louheesta räjähdysaineen sisältämän typen kolme eri fraktiota: ammoniumtyppi ($\text{NH}_4\text{-N}$), nitraattityppi ($\text{NO}_3\text{-N}$) sekä nitriittityppi ($\text{NO}_2\text{-N}$).

Tutkimus ei käsittele malmin prosessoinnista aiheutuvia typpipäästöjä, eikä perehdy vesienkäsittelyyn typen takaisinottamiseksi kaivoksen purkuvedestä.

1.2 Tutkimuskysymykset

- Onko louhosnousun tyyppillä tai panostussukan hyödyntämisellä vaikutuksia louheen typpipitoisuuteen?
- Mitkä suunnittelutekniset muuttujat louhossuunnittelussa vaikuttavat louheen typpipitoisuuteen?
- Kuinka paljon maanalainen tuotantolouhinta tuottaa typpipäästöjä Kittilän kaivoksella?
- Miten analysoitavan louheen näytteenotto on täsmällisintä ja luotettavinta suorittaa?
- Minkälaisia mittausmenetelmiä olisi tarpeen suorittaa jatkossa typpipäästöjen seurannassa tai jatkotutkimuksissa?

1.3 Työn rakenne

Työ on rakenteeltaan jaettu seitsemään lukuun. Luvussa 2 esitellään typen kulkeutumisfraktiot ja niiden reaktiot räjähdysaineista ympäristöön sekä käydään läpi räjähdysaineen reaktioon vaikuttavia tekijöitä. Luvussa 3 perehdytään maanalaisen tuotantolouhinnan poraus- ja panostussuunnitteluun. Luvut käsittelevät louhintaa sekä niiden suunnittelua pohjautuen Kittilän kaivoksen empiirisesti hyväksi todettuihin menetelmiin.

Luku 4 esittelee louhostutkimuksen lähtökohdat, testilouhokset sekä tutkimuksessa käytetyt menetelmät. Luku 5 esittelee louhostutkimuksessa eri menetelmillä saatuja tuloksia sekä luvun lopussa esitellään tulokset louhoksien palamattomien räjähdysaineiden osalta. Luku 6 käsittelee saatuja tuloksia sekä perustelee tehtävät johtopäätökset ja arvioi toteutettujen menetelmien yhteyttä tuloksiin. Lisäksi luvussa 6 arvioidaan aiheen jatkotutkimuksien kannalta menetelmien oleellisia parannusehdotuksia sekä suosituksia.

1.4 Tutkimusmenetelmät

Kokeellinen tutkimus perustuu kairasydännäytteiden geologisten ominaisuuksien perusteella valittujen louhoksien tarkempaan arviointiin. Todenmukaisten tulosten mahdollistamiseksi suoritettiin kokeelliset liuotusanalyysit typen määrien mittaamiseksi louheesta. Tuloksien perusteella tehtäviä johtopäätöksiä tukevien taustatietojen ja virhelähteiden havainnoimiseksi tutkimusmenetelminä käytettiin tämän lisäksi myös reikäsuoritusmittauksia, kaasuuntumiskokeita, värinämittauksia, pora- ja panostusraportteja sekä louhosskannauksia.

1.5 Kittilän kaivos



Kuva 1. Kittilän kaivos ja Suurikuusikon avolouhos. (Black Box Network Services 2017)

Kittilän kultakaivos sijaitsee Lapin vihreän kiven vyöhykkeellä, n. 50km Kittilän kirkonkylältä koilliseen. Kaivoksen toiminnasta vastaa Agnico Eagle Finland Oy. Kaivosyhtiön omistaa kanadalainen Agnico Eagle Mines Ltd, millä on käynnissä olevia kaivosoperaatioita myös Kanadassa ja Meksikossa sekä malminetsintäprojekteja edellisten lisäksi Yhdysvalloissa ja Ruotsissa.

Kittilän kaivoksen ja rikastamon rakentaminen alkoi kannattavuusselvityksien valmistumisen jälkeen vuonna 2006 ja kaivoksen tuotanto aloitettiin avolouhintana vuonna 2008. Samaan aikaan kaivoksen rakentamisen kanssa käynnistettiin myös maanalaisen kaivoksen louhintatyöt.

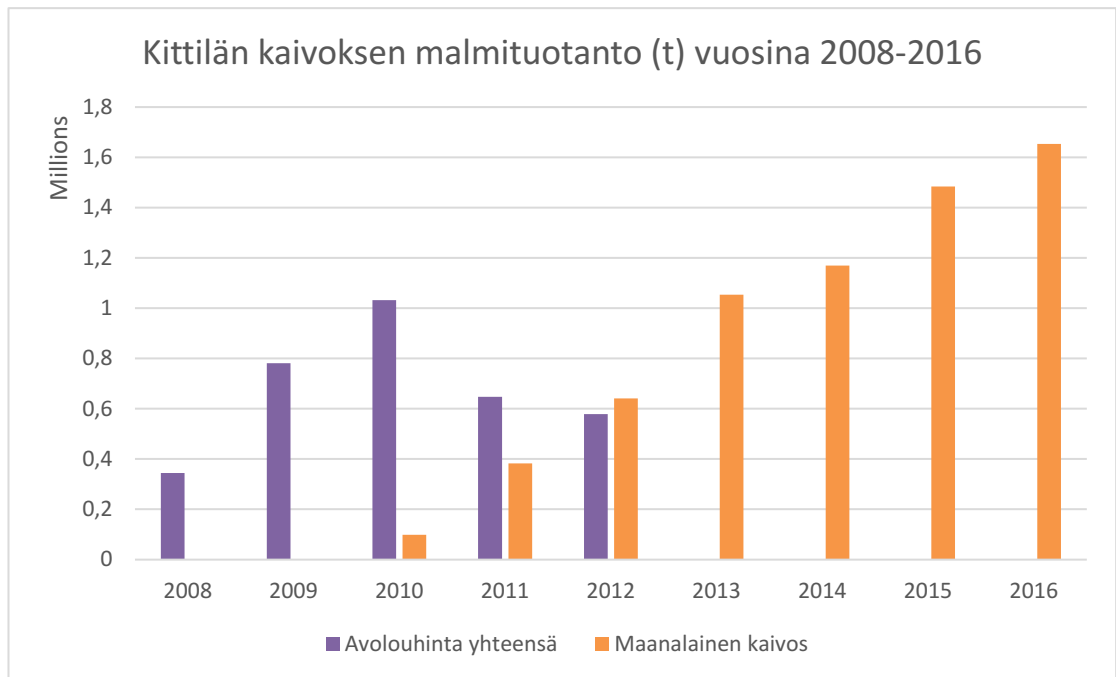
Vuonna 2007 kaivoksen rakentamispäätöksen jälkeisessä teknisessä raportissa esiintymän laajuudeksi kuvattiin seuraavassa taulukossa 1 esitetyt malmivarat ja varannot sekä vuosittaiseksi kullan tuotantomääräksi 150 000 unssia. Tuotantoarvion perusteella kaivoksen toiminnan arvioitiin kestävän 13 vuotta, vuoteen 2021 asti. (Doucet, ym. 2010)

Laajojen malminetsintä-projektien tuomien tulosten avulla esiintymä on kuitenkin paljastunut laajemmaksi ja vuoden 2016 loppuun mennessä Kittilän kaivoksen kokonaismalmivarannot olivat kasvaneet taulukon 1 mukaisesti.

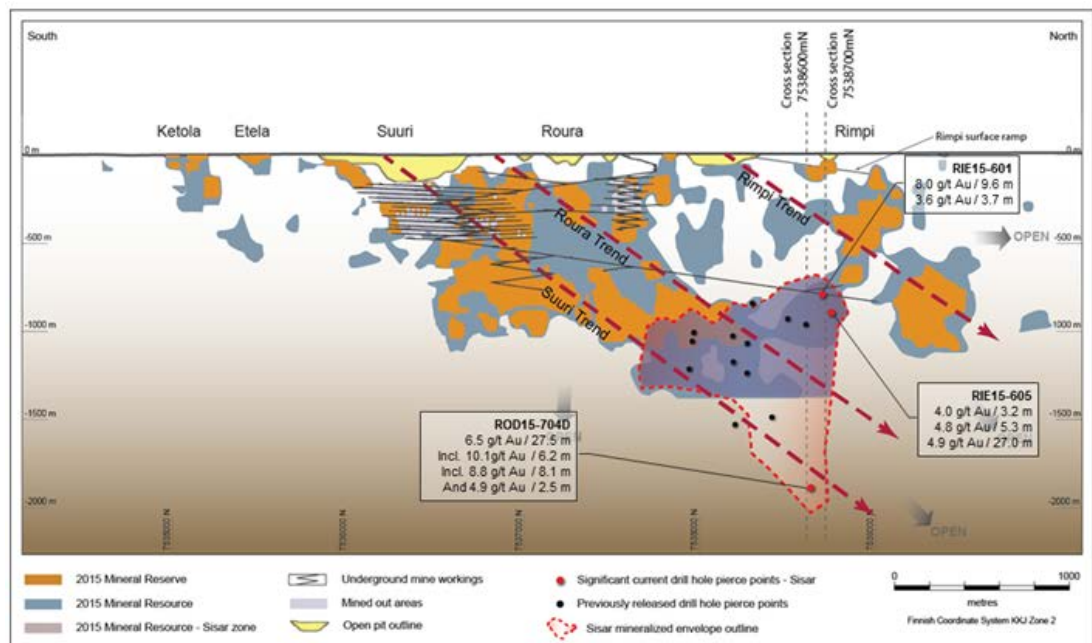
Taulukko 1. Malmivarojen raportoinnit eri vuosina (Doucet, ym. 2010) (Agnico Eagle Mines Ltd 2016)

Raportointi- ajankohta	Luokitus	Mt	g/t	000 oz Au
21.2.2007	Todennäköiset malmivarat	16,022	5,08	2616
	Todennäköiset malmivarannot	4,191	3,95	532
	Mahdolliset malmivarannot	2,78	5,51	493
31.12.2016	Todetut & todennäköiset malmivarat	30,055	4,64	4479
	Todetut & todennäköiset malmivarannot	20,721	2,92	1946
	Mahdolliset malmivarannot	11,059	4,05	1442

Kaivoksen maanalainen tuotanto aloitettiin vuonna 2010 ja vuodesta 2013 lähtien kaivos on toiminut pelkästään maanalaisen tuotannon varassa. Kaivoksen päivittäistä malmituotantoa on nostettu alkuperäisestä 3000 tonnista 4500 tonniin, minkä ansiosta vuosittaisen kullan tuotantotavoite vuodelle 2017 on 190 000 unssia. (Agnico Eagle Mines Ltd 2017) Kaivostoiminnan ennustetaan nykyisten tuotantoarvioiden mukaan jatkuvan vähintään vuoteen 2034 asti. Ja vuodesta 2018 alkaen yhtiön tavoitteena on nostaa malmin tuotantoa edelleen n. 2 miljoonaan tonniin vuodessa, mikä kullan tuotantomäärissä tarkoittaisi 205 000 unssia. Vuoden 2016 tuotantomäärillä mitattuna (Kuva 2.) kaivos on Euroopan suurin kultakaivos. (Agnico Eagle Mines Ltd 2017)



Taulukko 2. Kittilän kaivoksen malmituotanto vuosina 2008–2016.

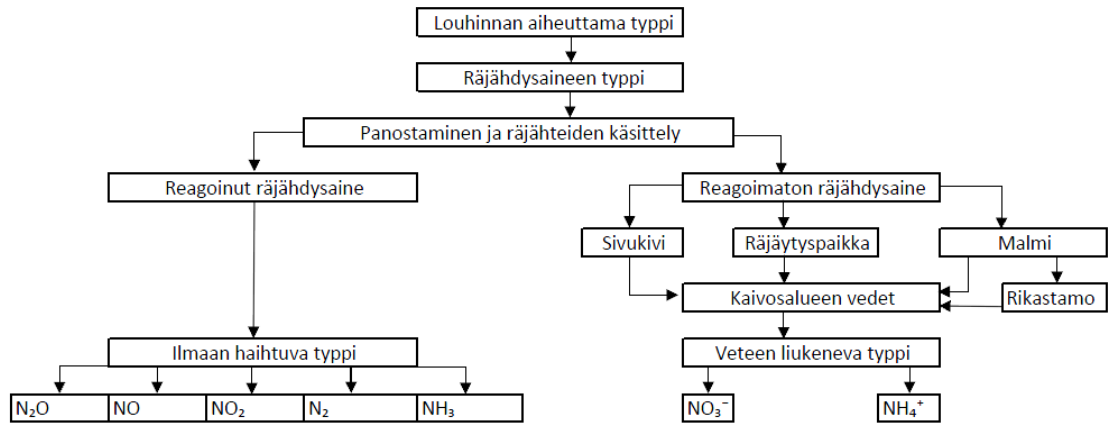


Kuva 2. Läpileikkaus Kittilän malmiesiintymästä (Agnico Eagle Finland Oy 2017)

Malmiesiintymän rakenne on esitelty kuvassa 3. Esiintymä on kapeajuonteinen ja pitkitäin jakaantunut Etelä-Pohjoissuunnan poikkileikkauksessa havaittavaan kuuteen pääalueeseen. Alueet ovat nimetty seuraavanlaisesti Ketola, Etelä, Suuri, Roura, Rimpi ja Sisar. Kaivoksen tuotanto on tällä hetkellä keskittynyt pääasiassa Suuren ja Rouran yläosien alueelle, mutta 2018 alkaen suunnitelmassa on aloittaa tuotanto Suuren syväosissa sekä Rinnan alueella.

2 Louhinnasta aiheutuvat typpipäästöt

2.1 Typen kulkeutuminen louhinnassa



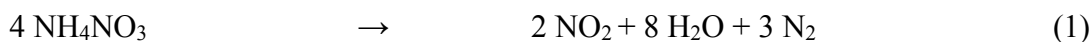
Kuva 3. Louhinnasta aiheutuvan typen kulkeutumiskaavio. (Jermakka, ym. 2015)
(Forsyth;Cameron ja Miller 1995)

Louhinnasta aiheutuvat vesiliukoiset typpipäästöt on peräisin räjähdysaineen pääraaka-aineena käytettävästä ammoniumnitraatista (NH_4NO_3) sekä räjähteestä riippuen natriumnitraatista (NaNO_3) ja kalsiumnitraatista (CaNO_3). Räjähdysaineen sisältämän typen kulkeutumisen kannalta merkittävää on reagoiko kaikki porareikään panostettu räjähdysaine, jolloin optimitilanteessa sen sisältämä typpi vapautuu ympäristöön typpikaasuna (N_2) ja typen oksideina (NO , NO_2 , N_2O), eikä aiheuta vesiliukoisia typpipäästöjä. (Forsyth;Cameron ja Miller 1995)

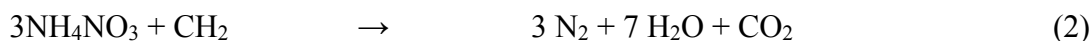
Jotta räjähdde voi toimia suunnitellusti, on räjähteen (lähtöaineen) eksotermisessä reaktiossa muodostettava kaasua (palamistuotteet), mikä lämpötilan, paineen ja ääntä nopeamman muodostumisnopeuden luomalla shokkiaallolla särkee ympärillä olevaa kivimateriaalia. Tätä kemiallista reaktiota kutsutaan detonaatioksi. Detonaatiossa räjähdysaineen reaktiosta vapautuva energia ylläpitää etenevää iskuaaltoa, kunnes räjähdysaine on reagoiut kokonaan tai kemiallisen reaktion mahdollistavan räjähdysaineen olosuhteet ovat muuttuneet niin että ketjureaktio loppuu. (Räjähdeyhdistys 2005)

Detonaation lisäksi räjähdde voi reagoida deflagroimalla, jolloin räjähteen kemiallinen reaktio etenee lämmönjohtumisen ja lämpösäteilyn avulla materiaalissa ääntä hitaammin, detonaatiolle ominaista shokkiaaltoa luomatta. Lähtöaineet siis palavat nopeasti räjähdyskaasuiksi. (Räjähdeyhdistys 2005)

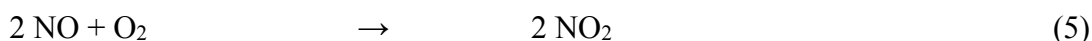
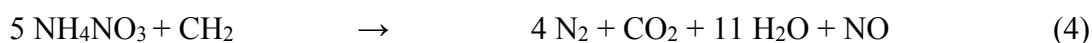
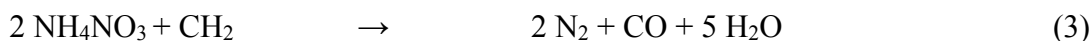
Typen kaasumaisten reaktiotuotteiden fraktiot riippuvat reaktion lämpötilasta ja räjähteen happitaseesta. Rajoitetussa reaktiossa emulsioräjähteen sisältämä happi ei kulu kokonaan reaktiossa ja yhtälössä 1, palamistuotteina syntyy typpikaasun lisäksi myös typpidioksidia. (Mahadevan 2013, 33,46)



Optimaalisessa reaktioyhtälössä 2, räjähteen sopivan polttoaineen ja hapettimen suhteen happitasapainon ollessa 0, kaikki räjähteen sisältämä happi kuluu reaktiossa ja typpi vapautuu ainoastaan typpikaasuna (N_2). Yhtälöissä polttoaineen hiilivetyjen osuutta kuvaa metyleenimolekyyli (CH_2). (Mahadevan 2013, 46)



Polttoaineen ja hapettimen suhteen muuttuessa epäoptimaaliseksi, huomataan että reaktiossa yhtälöissä 3 ja 4 syntyy myös hiilimonoksidia (CO) tai typpimonoksidia (NO), mikä muuttuu ilmankehän hapen kanssa reagoidessaan yhtälön 5 mukaisesti typpidioksidiksi (CO_2). (Jermakka, ym. 2015) (Mahadevan 2013, 46)



Räjähdysaineen jäädessä reagoimatta typen fraktiot jäävät haihtumatta irrotettuun kivi-materiaaliin, minkä seurauksena typpi vapautuu hitaasti liukenemalla kaivosalueen vesiin seuraavan yhtälön 6 osoittamien fraktioiden muodossa. Räjähteen sisältämät kiinteät nitraatit hajoavat liuetessaan nestemäiseksi ammoniumioniksi (NH_4^+) ja nitraatti-ioniksi (NO_3^-). (Sjölund 1997)



Taulukko 3. Emulsioräjähteen pääraaka-aineena käytettävän ammoniumnitraatin ominaisuuksia (Mahadevan 2013, 33)

Ammoniumnitraatin ominaisuuksia	
Molekyylipaino	80
Muodostumislämpö	1098 cal/g
Räjähdyslämpö	346 cal/g
Tiheys	1,725 g/dm ³
Vesiliukoisuus [20 °C]	66/100g
Happitase	20 %
Arvioitu syttymislämpötila	1500 °C
Typipitoisuus	35 %

2.2 Emulsioräjähteet

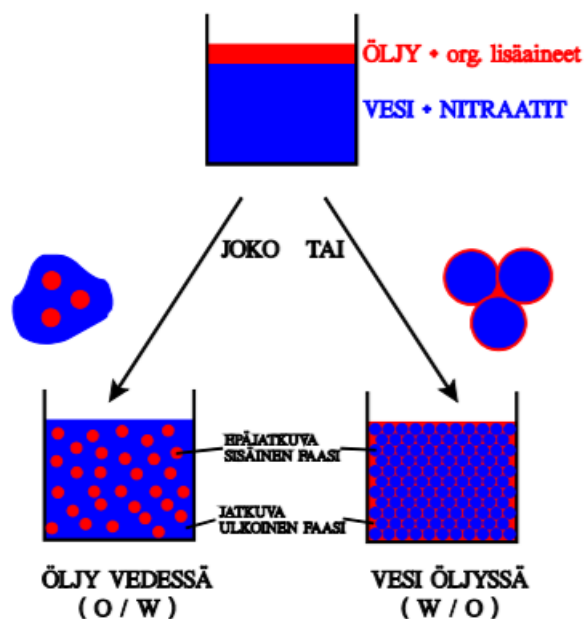
Emulsioräjähdysaineilla tarkoitetaan vesi-öljyssä tai öljy-vedessä tyyppisiä räjähdysaineita, mitkä koostuvat toisiinsa liukenemattomien nesteiden seoksesta. Seoksen faasirakenteiden kannalta emulsiotyypit voidaan jakaa vesi-öljyssä emulsioihin (emulsioräjähteet) sekä öljy-vedessä emulsioihin (vesigeeliräjähteet). Emulsioräjähteet ovat nykyään ylivoimaisesti käytetyimpiä räjähteitä maanalaisessa louhinnassa niiden tehokkuuden ja monikäyttöisyyden vuoksi. Tämän takia tässä työssä perehdytään ainoastaan vesi-öljyssä emulsioihin.

Seos koostuu pääraaka-aineiltaan ammoniumnitraatin vesiliuoksesta, mineraaliöljystä ja tarvittavista lisäaineista. Räjähteen hapettimena toimivan nitraattiliuoksen osuus on emulsioräjähteestä n. 90–95 massa- %. Mineraaliöljyn ja lisäaineiden osuus on n. 4-8 massa- %. Emulsio on rakenteeltaan vaseliinimaista ja väriltään vaalean kellertävää. Erilaisia öljy-laatuja käyttämällä on mahdollista vaikuttaa räjähteen viskositeettiin, jolloin sitä voidaan erilaisilla jäykkyyksillä valmistaa erityyppisiin käyttökohteisiin. (Räjähddehydistys 2005) Tarkemmat pääraaka-aineet ja emulsion yleinen koostumus on listattu seuraavassa taulukossa. (Mahadevan 2013, 115)

Taulukko 4. Emulsioräjähteen tyyppinen koostumus. (Mahadevan 2013, 115)

Sisältö	Pitoisuus [%]
Ammoniumnitraatti	62 %
Vesi	11 %
Kalsiumnitraatti	8 %
Natriumnitraatti	6 %
Natriumperkloraaatti	5 %
Mineraaliöljy	3 %
Vaha	2 %
Emulgointiaine	1,2 %
Atomisoitu alumiini	0,8 %
Kaasuuntumisaine	1,0 %
Happitase	lähes 0

Vesi-öljyssä emulsioissa öljy sijaitsee seosrakenteen jatkuvana faasina ja vesipohjainen-nitraattiliuos epäjatkuvana sisäisenä faasina. Ts. emulsioseoksen nitraattiliuos sijaitsee hyvin pieninä pisaroina öljykalvon erottamana, minkä vuoksi räjähteen hapettimen ja polttoaineen molekyylien kosketuspinta-ala on saatu huomattavasti suuremmaksi kuin faasirakenteen ollessa päinvastoin. Nitraattiliuos saadaan epäjatkuvaksi faasiksi hajottamalla se mikropisaroiksi emulgointiainetta hyödyntämällä mineraaliöljyyn sekoituksen yhteydessä. Emulgointiaine myös estää valmistetun seoksen faaseja eroamasta toisistaan. (Mahadevan 2013, 113-117) (Räjähdeyhdistys 2005)



Kuva 4. Emulsiomatriisien kaksi faasirakennetta. (Oy Forcit Ab/ Pentti Vihanto 2007)

Emulsioräjähteiden valmistusmenetelmät riippuvat valmistettavan tuotteen laadusta. Valmistessa patruunoituja tuotteita, tapahtuu räjähteen valmistus seoksen sekoituksesta herkistykseen ja pakkaamiseen tehtaan sisällä muodostaen yhtenäisen ja jatkuvan valmistuslinjan. Emulsioräjähteitä valmistetaan myös pumpattavina tuotteina, jolloin tehtaalla valmistetaan vain nitraatti- ja polttoaineliuokset ja matriisi herkistetään panostusajoneuvossa panostuksen yhteydessä. Tämä parantaa varastoinnin ja kuljetuksen turvallisuutta sekä vähentää kuljetusrajoituksia. (Räjähdeyhdistys 2005)

Kuten kappaleessa 2.1 mainittiin, räjähteen hapettimen ja polttoaineen suhteella on suuri merkitys kemiallisessa reaktiossa syntyviin tuotteisiin, koska sillä muutetaan räjähteen happitasetta. Happitase kuvaa reaktiossa syntyvää happiylimäärää prosenttisuhteena räjähdysaineen painoon.

Happitase lasketaan seuraavalla yhtälöllä 7,

$$OB = \frac{100 \cdot M_O}{M_E} \left(z - 2x - \frac{y}{2} \right) \quad (7)$$

Missä,

OB	= Happitase [%]
M _O	= Hapen molekyylipaino
M _E	= Räjähteen molekyylipaino
z	= Happiatomien kappalemäärä
x	= Hiiliatomien kappalemäärä
y	= Vetyatomien kappalemäärä

Esimerkiksi ammoniumnitraatin (NH₄NO₃) happitase lasketaan seuraavasti:

$$\frac{100 \times 16,00}{(4 \times 1,008 + 3 \times 16,00 + 2 \times 14,008)} \times \left(3 - 0 - \frac{4}{2} \right) = 19,98 \% \quad (8)$$

Kuten reaktioyhtälössä 1 ja happitaseen yhtälössä 8 osoitetaan, pelkän ammoniumnitraatin reagoidessa kaikki sen sisältämä happi ei kulu reaktiossa ja palamistuotteena on typen lisäksi haitallista typpidioksidia (NO_2). Ammoniumnitraatilla itsessään on happiylijäämä reagoidessaan, minkä vuoksi räjähteen päästäkseen happitasapainoon, se tasapainotetaan emulsioissa sopivalla polttoöljyn sekoituksella. (Mahadevan 2013, 114-115)

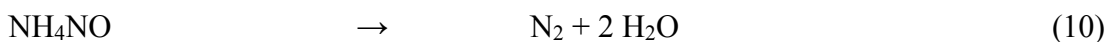
Happitaseen lähestyessä 0, räjähdre reagoi maksimaalisella tehokkuudella ja palamiskasuina on mahdollisimman vähän myrkyllisiä kaasuja. (Mahadevan 2013, 16-17)

Emulsioräjähteen pääraaka-aine, emulsiomatriisi itsessään ei ole räjähtävää, vaan luokitellaan hapettavaksi aineeksi. (Forcit Oy Ab 2015). Jotta emulsiomatriisista saadaan räjähtävää, herkistetään se joko kemiallisella kaasuuntumisaineella, ilmalla tai ontoilla mikropartikkeleilla. Herkistyksen perusajatuksena on muodostaa riittävän tiheään ja tasisesti kaasukuplia emulsioseoksen komponenttien ympärille. Herkistetyn emulsioräjähteen kaasukuplat puristuvat detonaation luoman iskuaallon vaikutuksesta ja kuume-nevat, mikä mahdollistaa detonaation välittymisen. Herkistäminen laskee matriisin tiheyttä, minkä vuoksi kaasuuntumista on mahdollista mitata matriisin tiheyden muutosta arvioimalla. Herkistäjänä voidaan käyttää mitä tahansa emulsioon liukenematonta kaasua, mutta typpikaasusta (N_2) tai hiilidioksidista (CO_2) muodostettujen kuplien on osoitettu olevan vakaampia ja nopeammin muodostuvia kuin pelkästä ilmasta muodostettujen.

Yleisesti käytettyjä kemiallisia kaasutusliuoksia ovat urean, natriumtiosyanaatin ja natriumnitraatin eri yhdistelmät. Kirjallisuuslähteen mukaan kaasutusliuoksissa käytetty Natriumtiosyanaatti (NaSCN) nopeuttaa räjähteen kaasuuntumista huomattavasti. Räjähteen tiheyden muutoksessa 1.38 kg/dm^3 :stä n. 1.05 kg/dm^3 :iin kestää ko. epäorgaanista ioniyhdistettä käyttämällä yli tunnin sijasta vain 10 minuuttia. (Räjähdeyhdistys 2005) (Mahadevan 2013, 108-111)

Typpikuplien muodostuminen räjähteen herkistämisessä eri kaasuuntumisaineilla voidaan kuvata seuraavien reaktioyhtälöiden mukaisesti. (Mahadevan 2013, 108-111)

Natriumnitriitin käyttö kaasutusliuoksena:

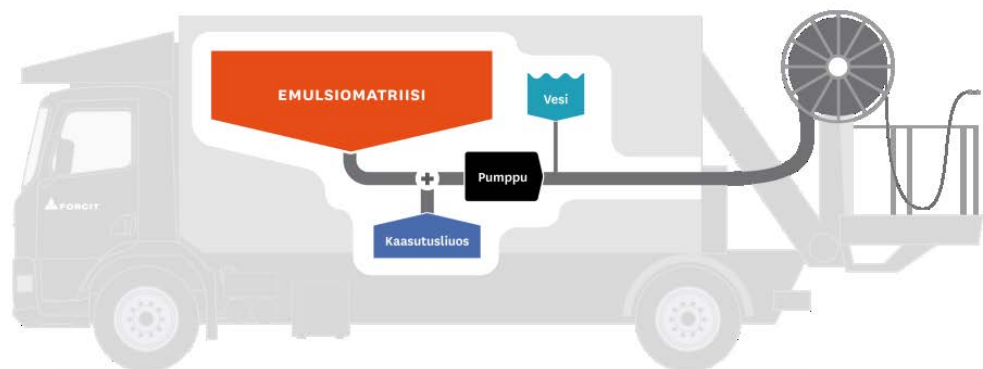


Kaasuuntumisen kiihdytintä esimerkiksi Natriumtriosyanaattia käytettäessä:



Emulsioräjähteen herkistämisellä on mahdollista muuttaa räjähteen räjähdysnopeutta, koska räjähdysnopeus on riippuvainen räjähteen tiheydestä. Käytettävä tiheysalue emulsioräjähteelle on 0,7-1,3 kg/dm³ ja saavutettavat räjähdysnopeudet ovat 2000–6000 m/s välillä. Käyttämällä räjähteen lisäaineena metallijauheita, kuten atomisoitua alumiinia, on mahdollista nostaa räjähdysnopeutta sekä räjähdyslämpöä. (Räjähdeyhdistys 2005)

Herkistystapa riippuu emulsioräjähteen toivotuista ominaisuuksista. Kemiallinen herkistäminen on tullut jatkuvasti yleisemmäksi viime vuosikymmenien aikana nopeamman sekoittumisen ja prosessin käytännöllisyyden vuoksi. Kaasulla herkistämisellä on kuitenkin rajoitteensa huonossa paineensietokyvyssä esimerkiksi pitkillä panospituuksilla. Suurempaa paineensietoa tuo herkistäminen ontoilla mikropalloilla. Mikropalloina käytetään yleisesti onttoja lasi- tai muovipalloja, perliittiä tai hartsipohjaisia materiaaleja. (Mahadevan 2013, 108-111)



Kuva 5. Kemiitti 810 Panostusajoneuvon pumppausjärjestelmän toimintaperiaate.
(Forcit Oy Ab 2014)

Vesi-öljyssä emulsioita on esimerkiksi maanalaisessa louhinnassa laajasti käytetty Forcit Oy Ab:n valmistama Kemiitti 810, mitä käytetään pääasiallisena räjähdysaineena Kittilän kaivoksen maanalaisessa louhinnassa. Kittilässä käytettävä Kemiitti 810 toimitetaan kaivokselle emulsiomatriisina ja herkistetään vasta reikiin pumppaamisen yhteydessä kuvan 5 esittelemän toimintaperiaatteen mukaisesti panostusajoneuvon pumppujärjestelmässä sijaitsevassa staattisessa sekoittimessa (Site Sensitized Emulsion).

Kemiitti 810 herkistetään kemiallisesti ureaa sisältävällä kaasutusliuoksella ja kaasuuntuminen varmistetaan panostustyön yhteydessä suorittamalla räjähdennyksien tiheyden muutoksien seuranta. (Oy Forcit Ab 2015)

Taulukko 5. Kemiitti 810 Räjähdystekniset ominaisuudet
(Forcit Oy Ab 2014)

Kemiitti 810 Räjähdystekniset ominaisuudet	
Räjähdysnopeus	3000-5000 m/s
Räjähdyslämpö	2,9 MJ/kg
Kaasutilavuus (NTP)	990 l/kg

2.3 Typpipäästöjen muodostumiseen vaikuttavat tekijät

2.3.1 Räjähteen liukeneminen

Rakoilevassa kallioperässä kulkeva vesi voi aiheuttaa porareikien täyttymistä vedellä, jolloin porareikiin panostettava räjähdysaine on kosketuksissa virtaavan veden kanssa. Emulsioräjähteen vesiliukoisuus ainetta häiritsemättä on kuitenkin hidasta. Heikko vesiliukoisuus johtuu emulsioräjähteen faasirakenteesta, missä vesiliuoksen tyypiyhdisteet ovat polttoainefaasin ympäröiminä ja näin ollen estävät tyypeä liukenemasta veteen. (Revey 1996)

Aikaisemmin tehdyssä tutkimuksessa (Watson 1991) vertailtiin eri nitraattipohjaisten räjähdysaineiden typen vesiliukoisuutta ajan funktiona. Tulosten perusteella tutkimuksen aikaisen emulsioräjähteen liukeneminen on käytännössä liukenematonta alle 6 tunnin sisällä testin aloituksesta ja vähäistä vielä ainakin 6 vuorokauden kuluttuakin. Tutkimuksessa pidettiin todennäköisenä että räjähde menettää herkkyytensä, kun nitraattien liukeneminen ylittää 25 %. (Revey 1996)

Taulukko 6. Nitraattien vesiliukoisuus eri räjähteissä. (Watson 1991)

Nitraattien vesiliukoisuus eri räjähteissä [%]	0,1 h	1 h	6h	6d
ANFO	~25%	>50%	-	-
Vedenkestävä ANFO	-	~25%	-	-
Vesigeeliräjähde	-	-	24,6 %	
Emulsioräjähde	-	-	0,6 %	1,2 %

Räjähteen liukenemisen ollessa vähäistä, voi porareikään virtaava vesi voi kuitenkin katkaista räjähdepilarin, mikä vaikuttaa detonaation välittymiseen koko panospituuden läpi. Räjähdepilarin epätäydellisen detonaation seurauksena reiän ympäröimään kiveen ei kohdistu suunniteltua shokkiaaltovaikutusta ja kiveä jää irrottamatta.

2.3.2 Kriittinen tiheys

Vaikka emulsioräjähteen räjähdysnopeus on verrannollinen sen tiheyteen, sen herkkyys heikkenee ratkaisevasti räjähteen tiheyden ylittäessä $1,25 \text{ kg/dm}^3$ (Mahadevan 2013), tätä kutsutaan kriittiseksi tiheydeksi. Kriittisen tiheyden ylittyessä herkistävät kaasukuplat ovat harventuneet, jolloin räjähdde menettää kyvyn ylläpitää kemiallista reaktiota.

Panostuksen aikainen kriittisen tiheyden ylittyminen voi johtua räjähdysaineen epätasaisesta kaasuuntumisesta, porareiän pituudesta mutta myös porareiän paineolosuhteiden muutoksista. Porareiän paineolosuhteiden muutokset voivat johtua räjähdyspaineiden johtumisesta viereisestä reiästä, jolloin räjähddepilarin kriittinen tiheys paikoitellen ylittyy ja räjähdysainetta jää reagoimatta. Räjähdyspaineiden johtuminen reiästä toiseen voi aiheutua heikon tai rakoilevan kiven lisäksi myös jos porareiät ja niiden räjähddepilarit ovat liian lähekkäin. (Revey 1996) (Stiehr 2011)

Emulsioräjähteen kriittinen tiheys voi ylittyä myös porareikään virranneen veden pilarin aiheuttaman hydrostaattisen paineen tai oman massan vuoksi. Tämä on mahdollista kun porareiän pituus mahdollistaa riittävän korkean vesipilarin syntymisen räjähddepilarin päälle. Kaasuuntumismenetelmänä pitkissä porarei'issä on käytettävä esimerkiksi mikropalloilla herkistettyä emulsioräjähdysainetta, jotta varmistutaan räjähdysaineen herkkyyden säilymisestä. Kittilän kaivoksella on käytetty mikropalloherkistettyjä Kemix-patruunoita reikien pohjapanoksina, kun porareiän pituus lähestyy 30 metriä.

2.3.3 Heikkousvyöhykkeet ja ruhjeisuus

Louhittavassa kivessä sijaitsevat heikkousvyöhykkeet ja ruhjeet voivat osaltaan vaikuttaa räjäytyksen aikaisiin kivimateriaalin siirtymisiin niin, että räjähtämätön räjähddepilari katkeaa porareiän leikkaantuessa. Kivimateriaali voi myös sortua räjähddepilarin ympäriltä ennen suunniteltua räjähddepilarin räjäytysajankohtaa, jos rakosuunnat, kiven irtonaisuus ja nallien välinen hidastusaikaviive sen mahdollistavat.

Panostussuunnittelussa määriteltävillä nallien hidastusväleillä ja lisänallituksella on kuitenkin mahdollista minimoida riskejä reikien leikkaantumisen vaikutuksiin. Jos räjäytyksessä porareikien nallien väliset hidastusajat ovat liian pitkiä, on mahdollista että kivimateriaalilla on riittävästi aikaa liikkua ja katkaista viereisten räjähtämättömien reikien räjähddepilarit. Käytettäessä lisänallitusta eli nallit asennetaan sekä räjähddepilarin ylä- että alapäähän tai väliin, on räjähteen detonaation onnistuminen varmempaa kuin pelkästään pohjanallilla. (Revey 1996)

Louhittavan kiven laatu voi myös vaikuttaa panostuksen onnistumiseen räjähdysaineen vuotaessa porareiän ympärillä oleviin rakoihin. Tästä johtuen rakoilevassa kivessä on

suositeltavaa käyttää apuna polyetyleenistä valmistettuja panostussukkia, jotka estävät räjähdysaineen vuotamisen porareian ympärillä oleviin rakoihin.

2.3.4 Poraus ja suunnittelu

Louhoksien porauksen ja panostuksien suunnitteluvaiheessa on erityisen tärkeää että käytettävissä oleva tieto on oikea-aikaista ja toteutuneista porauksen sekä panostuksen muutoksista raportoidaan, niin että niihin on mahdollista reagoida.

Porausvaiheessa porakanget saattavat jumiutua porattavaan reikään, jolloin porari joutuu siirtämään reikää suunnitellusta kohdasta. Myös porakoneen puomiston tai porakasetin vaatima tilantarve voi olla esteenä poratessa, jolloin suunniteltua reikää ei ole mahdollista porata ja porasuunnitelmaan joudutaan tekemään muutoksia.

Poraus voi myös epäonnistua lustan tai heikkousvyöhykkeen aiheuttaman reiän taipumisen johdosta, jolloin porareikien edut ja reikävälit saattavat poiketa suunnitellusta. Näiden kasvaessa liian suureksi ei räjähdysten aiheuttama iskuaalto pysty rikkomaan tarvittavaa kivimäärää, aiheuttaen sen että viereisillä rei'illä ei ole tarvittavaa purkautumistilaa. Reikävälin kaventuessa riski aiemmin mainittuun kriittisen tiheyden ylittämiseen kasvaa.

Jos porareiät ovat liian lähekkäin toisiaan, on räjähdyspaineiden johtumista mahdollista vähentää poraamalla tyhjäksi jätettävä porareikä kahden edellisen väliin tai käyttämällä vierekkäisten reikien välisenä räjäytysviiveenä riittävän lyhyttä väliä tai jopa samanaikaista hidastusaikaa estääkseen räjähteen kuolleeksi puristumisen tai räjähddepilarin leikkaantumisen. (Revey 1996)

Muutoksien ja niiden vaikutusten jäädessä huomioimatta on em. räjähdysten epäonnistumiseen vaikuttavien tekijöiden ilmenemiselle korkeampi riski.

2.3.5 Panostustyö

Panostustyössä ja räjähdysaineiden käsittelyssä on oltava erityisen huolellinen ja tarkkavainen työmenetelmien ja ohjeistuksien noudattamisessa. Vaikka emulsioräjähteet ovatkin turvallisia käsitellä ja epäherkempiä verrattuna esimerkiksi dynamiittiin (Räjähddehydistys 2005), on panostustyöllä ja sen toteutuksella suuri merkitys siitä aiheutuviin tyypipäästöihin.

Panostustyövaiheen kriittisimmät tyypipäästöt johtuvat porareikien ulkopuolisista räjähdysaineista, mitkä hyvinkin suurella todennäköisyydellä jäävät reagoimatta ja lisäävät si-

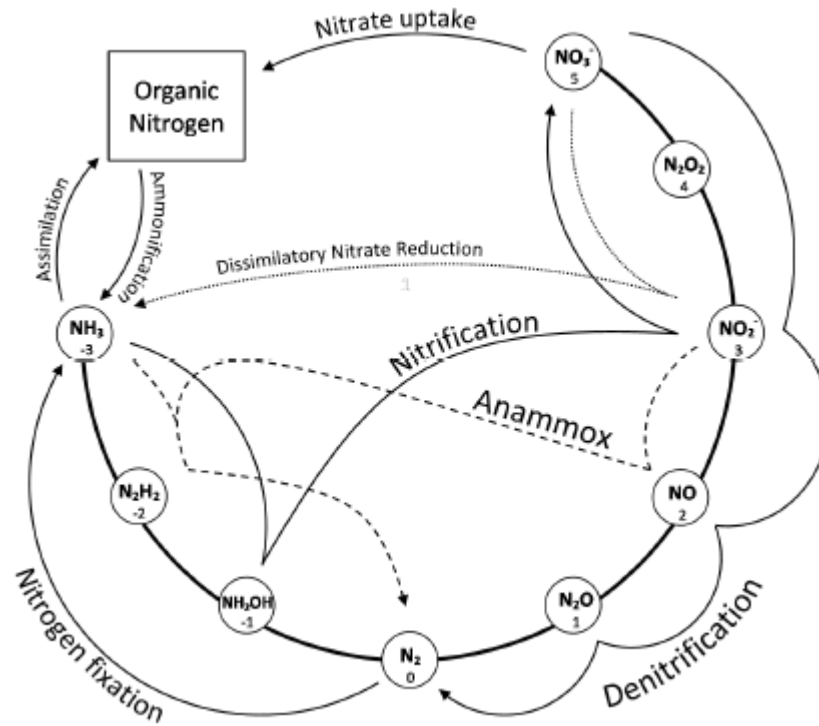
ten kaivoksen vesien typen määrää. Tämän vuoksi panostustyön siisteyteen on kiinnitettävä huomiota ja kerättävä panostustyön päätteeksi porareikien ulkopuoliset räjähdysaineet hävitettäväksi asianmukaisesti. (Revey 1996)

Panostuksessa on myös huomioitava räjähdysaineen kaasuuntumisesta johtuva turpoaminen. Porareikäkohtaiset panospituudet ja räjähdemäärät lasketaan suunnitteluvaiheessa käytettävän räjähteen ominaisuudet huomioon ottaen. Panostusmenetelmien muutoksien vuoksi tarkat emulsiomäärät eivät välttämättä pidä paikkaansa esimerkiksi räjähdepatruunoiden käytön vuoksi porareiän pohjaa tulpatessa. Tällöin panostajan täytyy huomioida räjähteen turpoamisvara reikäkohtaisen kannen paksuudelle panostaessa, jotta räjähdysaine pysyy suunnitellulla panospituudella eikä turpoa louhoksen yläperään, kuten seuraavassa kuvassa 6.



Kuva 6. Panostettua kenttää ja porarei'istä turpoavaa emulsioräjähdettä.

2.4 Typpi ympäristössä



Kuva 7. Typpen kiertokaavio (Jermakka, ym. 2015)

Typpikaasu (N_2) itsessään on hajuton, mauton, väritön ja inertti ilmakehän kaasu. Typpi voi esiintyä luonnossa typpimolekyylin lisäksi myös erilaisina yhdisteinä esimerkiksi nitraatteina ja ammoniumioneina maaperässä sekä vesistöissä. Typpi ja sen yhdisteet ovat luontaisia osana erilaisten ekosysteemien ravintoketjuja ja prosesseja. Suurilla pitoisuuksilla sen vaikutukset kuitenkin kääntyvät negatiivisiksi aiheuttaen vesistöjen rehevöitymistä tai happamoitumista. (Tchobanoglous;Burton ja Stensel 2003)

Kuvassa 7 on esitelty typpen yhdeksän eri hapetusastetta ja niiden väliset muuntautumisprosessit nitrifikaatio ja denitrifikaatio. Nitrifikaatio kuvaa ammoniumionin (NH_4^+) hajoamista mikrobiologisissa prosesseissa ensin nitriitiksi (NO_2^-) ja lopulta nitraatiksi (NO_3^-). Tämän jälkeen alkaa typpen denitrifikoituminen, missä mikrobiologisten prosessien seurauksena nitraatti (NO_3^-) muuntuu lopulta typpikaasuksi (N_2). (Tchobanoglous;Burton ja Stensel 2003, 619)

2.5 Typpipäästöistä laaditut tutkimukset

Louhinnan aiheuttamista typpipäästöistä ja palamattomien räjähdysaineiden määristä on laadittu tutkimuksia, missä louhetta ja prosessivesiä on analysoitu erilaisin menetelmin. Luulajan yliopistolla tehdyssä tutkimuksessa (Sjölund 1997) analysoi eri kaivoksilta ja tunnelilouhinnoista saatuja näytteitä eri menetelmillä. Näytteiden louhinnoissa oli käytetty räjähdysaineena sekä ANFOa että emulsioräjähdysaineita. Tutkimuksessa osalle näytteistä uutto suoritettiin 10m³ konteissa, missä typpipitoisuutta analysoitiin louheen läpi kulkevasta vedestä. Osalle näytteistä suoritettiin vesiuutto-ravistelusarjat, missä n.250g näytteet analysoitiin eri kiintoainessuhteilla L/S 1,4,8, 12 ja 16. Näytteitä ravisteltiin 18h sarjoissa.

Rahko (2015) Aalto yliopistolta Forcitin kanssa yhteistyössä tehdyssä tutkimuksessa tutki avolouhinnassa Kemiitti 610 emulsioräjähdysaineesta johtuvia typpipäästöjä koeräjäytyksessä räjäytettyyn louheeseen. Viittä liuotusnäytettä varten kerättiin keskimäärin 873 kg käsittelemätöntä louhetta, joiden liuotusaikana mitattiin louheesta liuennettua typpeä. Liuotuskoe häiriintymättömänä kesti n.3 kk. (Rahko 2015)

Hjerpe (2011) analysoi tutkimuksessaan LKAB:n Malmberget kaivoksen ja rikastuslaitoksen eri prosessivesistä kerättyjä näytteitä ja niiden typpipitoisuuksien perusteella tehtiin arviot palamattomien räjähteiden osuuksista pidemmän aikavälin louhinnalle. (Hjerpe 2011)

Forsberg ja Åkerlund (1999) tutkimuksessa tutkittiin muista tutkimuksista poiketen vesigeeli-räjähteistä aiheutuvia typpipäästöjä Kiirunan maanalaisessa rautakaivoksessa. Näytteeksi kerättiin pieniä eriä kolmea erilaista malmilaatua, joiden typpipitoisuudet mitattiin laboratorioanalyyseissä kokonaisarvion laskemiseksi. (Forsberg ja Åkerlund 1999)

Taulukossa 7 vertaillaan muissa tutkimuksissa saatuja typpipäästöjä sekä niiden suhteen laskettuja palamattomien räjähteiden osuuksia.

Taulukko 7. Vertailevat tutkimukset louhinnan aiheuttamista typpipäästöistä

Tutkimus	Typpipäästöt (Kok-N)	Palamattomien räjähteiden osuus	
		[%]	Tutkimuskohde
(Rahko 2015)	4 g/t	5 %	Avolouhos
(Sjölund 1997)	15-72 g/t	5-20%	Avolouhos & tunnelilouhinta
(Hjerpe 2011)	55 mg/l	9-11%	Maanalainen kaivos
(Forsberg ja Åkerlund 1999)	6,5-34,7 mg/kg	15-19%	Maanalainen kaivos

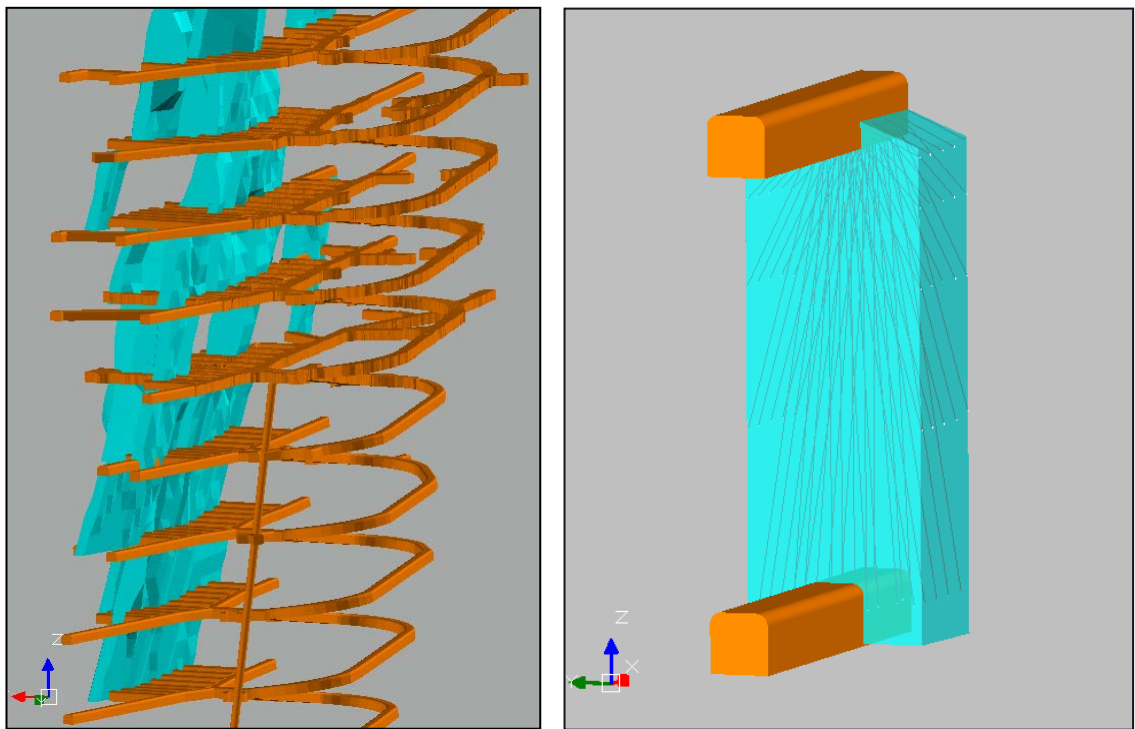
3 Maanalainen louhossuunnittelu

Tämä luku käsittelee maanalaista louhossuunnittelua ja keskittyy osakappaleissa pääpiirteittäin poikittaisen pengertäyttölouhinnan poraus- ja panostussuunnittelun esittelyyn.

3.1 Louhintamenetelmät Kittilän kaivoksella

Maanalaisen kaivoksen suunnitteluvaiheessa kannattavimmaksi louhintamenetelmäksi Kittilässä on valittu poikittainen sekä pitkittäinen pengertäyttölouhinnan soveltaminen välitasoittain. Suurikuusikon louhosalueen tasot on rakennettu 25m tasoväleillä ja Rouravaaran tasot 40m tasoväleillä.

Alakätinen tuotantolouhinta aloitetaan erillisen louhinta-alueen pohjatasolta ja jatketaan louhostäyttöjen edellyttämällä louhintajärjestyksellä ylemmille tasoille. Louhoksien täytömenetelmät valitaan louhintajärjestyksen mukaisesti, primäärilouhokset kovettuvalla pastatäytöllä sekä sekundäärilouhokset sivukivitäytöllä.



Kuvat 8 ja 9. Louhosmallit ja tasovälit. (Agnico Eagle Finland Oy 2017)

3.2 Louhosporauksen suunnittelu ja toteutus

3.2.1 Reikäkoko

Louhosten porauksessa käytetty reikäkoko määräytyy pääsääntöisesti louhosten tasovälin perusteella. 102 mm reikäkokoä käytetään pääsääntöisesti Rouravaaran alueen 40 m korkeissa louhoksissa sekä suurien louhosmallien (>10 000 t) louhinnassa porareikien taipumien minimoimiseksi ja suurempien leikkausvälien tuoman kustannustehokkuuden vuoksi. 89 mm reikäkoko soveltuu Suurikuusikon 25 m tasovälillä miltei kaikkien louhosten louhintaan ja leikkausvälit on mahdollista sijoittaa pienempiin louhosmalleihin. 76 mm reikäkoko soveltuu pienempien (<6000 t) ja on kaivoksella yleisesti käytetty pitkittäissuuntaisten louhoksien louhintaan.

Vaikka Kittilän kaivoksella käytössä olevat pitkäreikäporakoneet ovat kaikki varustettu kankien sijaan putkikalustolla, on porareikien taipumiseen silti kiinnitettävä huomiota.

3.2.2 Porareikien sijoittaminen

Louhoksen leikkauksien sijoittamisen tavoitteena on että poraleikkauksien välillä on so- piva etäisyys (reikien välinen etu), jotta leikkauksien välistä räjähteiden kriittisen tihey- den ylittämistä ei pääse tapahtumaan ja louhinnan eteneminen leikkauksittain varmistee- taan. Kittilän kaivoksen louhintamenetelmiin ja kalliooperän olosuhteisiin on todettu hy- väksi taulukon 8 mukaiset leikkauksien välit. Leikkausvälit ovat ohjeellisia ja riippuen louhoksen mallista, niitä joudutaan tarvittaessa soveltamaan.

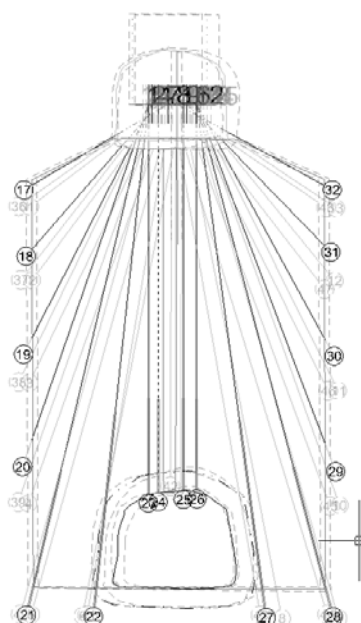
Taulukko 8. Louhosten leikkausvälit Kittilän kaivoksella (Agnico Eagle Finland Oy 2014)

Käytettävä reikäkoko	Pitkittäiset louhokset [m]	Poikittaiset louhokset [m]
76 mm	2	2,2
89 mm	2,2	2,5
102mm	2,5	3

Seuraavan taulukon 9 osoittamilla reikäväleillä varmistetaan että samalle leikkaukselle sijoitettavilla porarei'illä on reikien tavoitepituudessa riittävät etäisyydet saman leikkauksen viereisiin porareikiin. Reikävälit kapenevat porareiän pohjalta reiän alun suuntaan ja tämä huomioidaan panostussuunnittelun kappaleessa esiteltävien panospituuksien määrittelyllä. Määrittäessä porareikien pituuksia huomioidaan varoetäisyydet viereisiin louhostäyttöihin ja umpikiveen päättyvillä porarei'illä ohiporataan kiven irtoamisen varmistamiseksi.

Taulukko 9. Reikäkokojen mukaiset reikävälit.

Käytettävä reikäkoko	[m]
76 mm	2,5
89 mm	3,0
102 mm	3,5



Kuva 10. Leikkauskuva poraviuhkasta

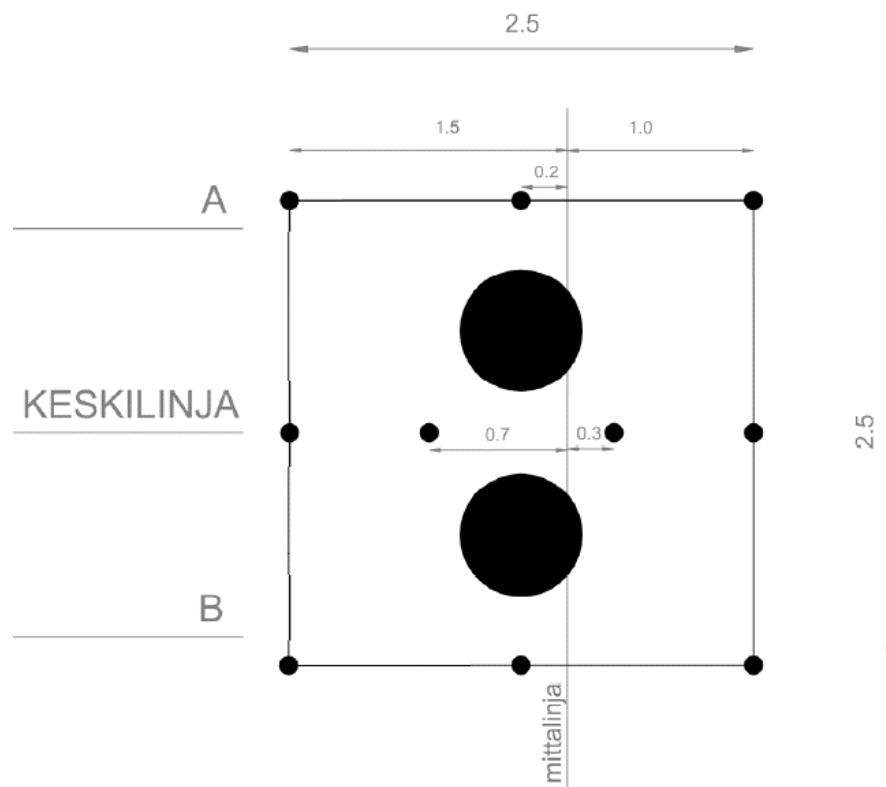
Jotta leikkauksille sijoitetut porareiät irrottaisivat louhosmallin seinältä kiveä mahdollisimman tasaisesti, ovat leikkauksien väliset porareiät sijoitettava toisistaan hieman eroavasti, ts. leikkausten lievää viuhkamaisuutta tavoitellen. Tätä on havainnollistettu kuvassa 10 leikkauskuvan seinärei'illä.

Reikien välisen räjäytysgeometrian huomioon ottaen, keskimmäisen, ns. avaavan leikkauksen porareiät suunnitellaan päätyleikkauksia korkeammalle louhosmallin seinillä. Leikkausten viuhkamaisuus myös tuottaa tasaisemman loughintatuloksen seinien osalta

niin, että porareikien pohjat eivät muodosta porrastusta seinille. Tämä parantaa sekä louhinnan tavoitteellisuutta että lastauksen turvallisuutta, kun seinillä ei ole karkeita pinnan eroavaisuuksia, jotka saattaisivat pudota lastauskoneen päälle.

3.2.3 Louhosnousut

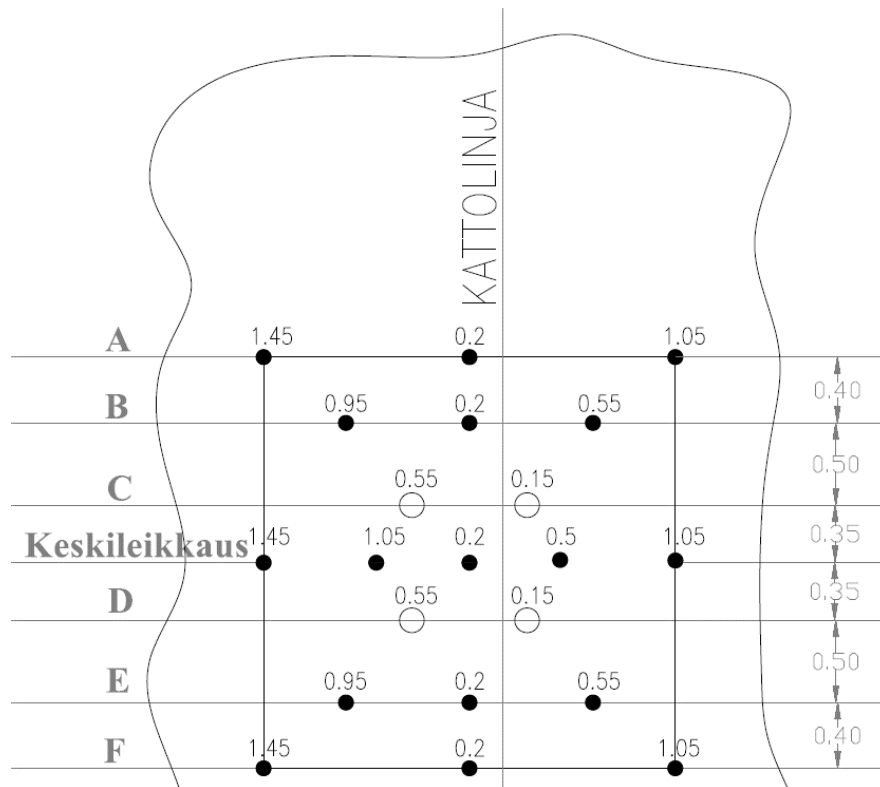
Louhosnousut toimivat louhoksen avauksena. Nousujen pääperiaatteena on varmistaa tyhjän tilan luonti louhosräjäytyksessä. Kittilän kaivoksella on käytössä 2 erilaista louhosnousutyyppiä, kuvassa 11 on esitelty kiertoporattuja avausreikiä hyödyntävä TRB-nousu sekä kuvassa 12 esitelty pitkäreikänousu (PRN), missä avausreiät porataan avarrettuina reikinä pitkäreikäporakoneella.



Kuva 11. TRB-nousun porakaavio

Louhinnan kannalta ensisijaisesti pyritään hyödyntämään louhoksen avauksena TRB-nousuja. TRB-nousuissa nousun keskelle porataan kaksi avausreikää TRB Rhino kierto-poraavalla nousuporalla, joiden avarrettu reikäkoko on 660mm.

Kyseisellä yläkätisellä nousuporalla ei ole mahdollista porata sivuttain kallistettuja, vaan maksimissaan 10 astetta etu- tai takakallistettuja avausreikiä. Tästä johtuen louhosmallin kallistus saattaa asettaa reunaehtoja nousun tyypille.



Kuva 12. PRN – porakaavio ja reikien etäisyydet kattolinjasta

Nousun ollessa kallistettu tai yläkätisen työskentelyn louhoksen alaperässä ollessa mahdollonta käytetään nousun avauksena kuvan 12 pitkäreikänousua. PRN:ssä, kuvassa 12 valkoisella merkatut avausreiät porataan samalla pitkäreikäporakoneella kuin muutkin nousun reiät, mutta nämä avarretaan halkaisijaltaan 152mm kokoisiksi. PRN:n pienempien avausreikien vuoksi ko. nousun reiät luodataan ja louhitaan 5 metrin räjäytysvaihein.

3.3 Louhospanostuksen suunnittelu ja toteutus

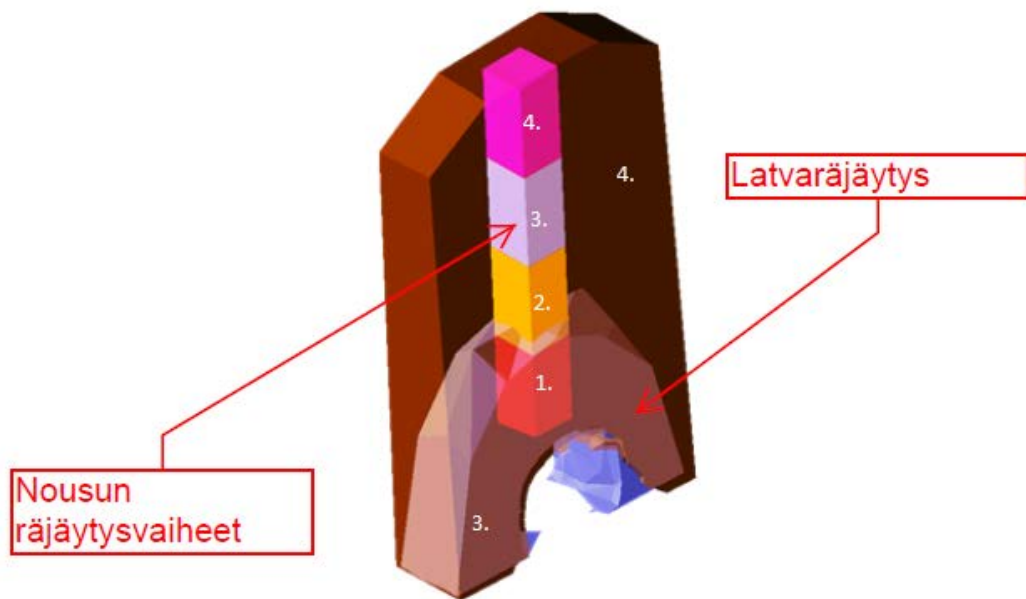
Panostuksen suunnittelun tarkoituksena on hyödyntää porauksen toteumaa niin, että louhittu tila on mahdollisimman lähellä tavoiteltua louhosmallia ja että louhittavalla kivellä on irtoamiseen tarvittava purkaantumistilavuus -sekä suunta. Optimaalisimman louhinnan kannalta on tärkeää määritellä räjäytyksessä suunnitellun kiven rikkomiseen tarvittava räjähdysainemäärä kg/m^3 eli ominaispanostus sekä tälle sopivan räjäytysgeometria sekä syttymisjärjestys – ja aikavälit.

3.3.1 Räjätysvaiheet

Panostuksen suunnittelu aloitetaan räjäytysvaiheiden varmistamisella. Louhinnan tueksi laaditaan poraleikkauksille luotavista räjäytysmalleista vapaan tilavuuden laskelmat, jotta voidaan määritellä louhinnan kannalta optimaalisimmat räjäytysvaiheet sekä niiden louhintatilavuudet.

Kolmen leikkauksen PRN-louhoksessa räjäytysvaiheina käytetään kuvan 13 mukaisia räjäytysvaiheita. Ensin louhitaan punaisella (1.) ja oranssilla (2.) havaittavissa olevat nousujen panospituudet. Tämän jälkeen louhitaan nousun lisäksi myös latvat (3.). Viimeinen osa nousua (4.) panostetaan loppuräjäytyksen yhteydessä, jolloin koko louhimaton loppulouhos räjäytetään yhdessä räjäytyksessä.

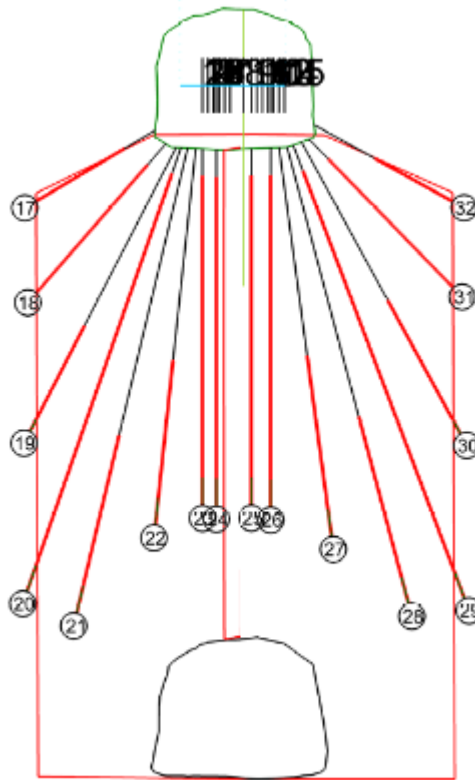
TRB-louhoksissa nousut louhitaan kokonaan louhosräjäytyksien yhteydessä, jolloin räjäytysvaiheita on ainoastaan kaksi, latvat ja loput.



Kuva 13. PRN-louhoksen räjäytysvaiheet

3.3.2 Panospituudet

Panospituudet suunnitellaan leikkauksien kallistuksista ja leikkausväleistä riippuen niin, että porareikien räjäytykselle ominainen vaikutusalue kattaa mahdollisimman kattavasti koko louhittavan leikkauksen, tarpeetonta ylipanostusta välttäten. Kuvan 14 leikkauskuvassa on esitelty esimerkkipanospituudet TRB-louhoksen loppuräjäytykselle.



Kuva 14. Esimerkkilouhoksen loppuräjäytyksen panospituudet

3.3.3 Nallituksen suunnittelu

Nallitusta suunniteltaessa nallien syttymisjärjestys, hidastusvälit ja räjäytykseen kuluva kokonaisaika määritellään louhoksen räjäytysgeometrian kannalta sellaiseksi että räjäytyksen aikana irtoavalla kivellä on koko räjäytyksen ajan riittävä purkaantumistilavuus sekä suunta.

Kittilän kaivoksella käytetään tuotantolouhinnassa elektronisia nalleja niiden hidastusaikojen tarkkuuden ja sytytysvarmuuden vuoksi. Elektroniset nallit ovat impulssiletkunalleihin verrattuna turvallisempia ja panostettu kenttä on mahdollista tarkistaa vikojen osalta ennen räjäytystä. Elektronisilla nalleilla räjäytyksessä käytettävä lyhin mahdollinen hidastusväli on 1 ms. (Vuolio ja Halonen 2012)

Figure 1 shows a 3D truss structure with nodes numbered 1 through 42. The structure is a rectangular prism with a central void. Nodes are numbered 1-42. Red numbers above nodes indicate vertical displacements in mm. Black numbers inside the central void indicate horizontal displacements in mm. Angles of 90.000° and 148.2752° are shown.

Louhosräjäytyksen nallien sytytysjärjestys laaditaan sovelletusti tapauskohtaisesti reiän avauskulman periaatetta noudattaen. Yksittäisen reiän purkaantumistilavuuden -ja suunnan varmistamiseksi porareivät asetetaan nallituskuvassa keskinäisten erojen ja etäisyyksien mukaisesti sekä määritellään räjähdysjärjestys siten että kuvassa osoitetut avauskulmat eivät olisi alle 90 astetta. Kuvassa 18 on esitelty esimerkki kolmen leikkauksen TRB-louhoksen nallien reikäjärjestys sekä näiden hidastevälien lyhenemiset.

Nallituksen suunnittelussa määritellään myös pintanallien tarve pitemmille rei'ille. Kittilän kaivoksella yleisrajana reikäpituuksilla tuplanallien käytölle on pidetty 15 metriä.

Nallituksen suunnittelussa määritellään myös pintanallien tarve pitemmille rei'ille. Kittilän kaivoksella yleisrajana reikäpituuksilla tuplanallien käytölle on pidetty 15 metriä.

Tärinämittauksia suoritetaan yleisesti louhintojen yhteydessä, jotta voidaan varmistua louhinnan turvallisuudesta ja tärinäohjearvoja noudattamalla estää louhinnasta aiheutuvat vauriot läheisille rakenteille tai rakennuksille. (Vuolio ja Halonen 2012) Kaivoksella poraus- ja panostussuunnitteluun liittyvän tärinämittauksen päätarkoituksena on arvioida panostuksen laadullista onnistumista.

toksia on shokkiaalto muuttunut kimmoaaloksi. (Vuolio ja Halonen 2012) Näitä louhosräjäytyksen tuottamia kimmoaaltoja eli tärinöitä seuraamalla ja louhosräjäytyksen nallitussuunnitelman hidastusaikoihin vertaamalla on mahdollista selvittää tärinää mahdollisesti aiheuttamattomat porareiät.

Poraus- ja panostussuunnittelun kannalta merkittävää louhintatärinöissä ei niinkään ole momentaanisen reikäpanoksen maksimiarvon määrittäminen ja tärinäohjearvojen noudattaminen, vaan momentaanisten reikäpanoksen aiheuttaman tärinän erotettavuus toisistaan. Tämän vuoksi tärinämittausta suunniteltaessa on otettava huomioon porareikien suunnan ja ympäröivän kallioperän olosuhteiden vaikutukset seismisten aaltojen käyttäytymiseen.

Detonaation synnyttämä iskuaalto alkaa nallin sijainnista riippuen reiän pinnalta tai pohjalta ja etenee porareiän sisällä räjähteelle ominaista detonaationopeutta. (Räjähdeyhdistys 2005) Tähän perustuen, voidaan olettaa porareiän toimivan pitkittäissuunnassa lähes pistemäisenä ja poikittaissuunnassa lähes poikittaisena shokkiaallon lähteenä. Tutkimuksessa (Hänninen 2011) monia tärinämittareita käyttämällä havaittiin että tärinöiden havaitsemissuunnalla suhteessa porareikään olevan merkitystä havaittavan tärinän voimakkuuteen ja selkeimmät tärinäpiikit olivat havaittavissa, kun mittauspiste oli kohtisuorassa porareikään nähden.

Tärinöiden välittymiseen kallioperässä vaikuttavat paljon kallion rakoilevuus ja kallioperän heikkousvyöhykkeet. Lähteen (Hamidzadeh 2014) mukaan väliaineen huokoisuus vaikuttaa mekaanisen aaltoliikkeen vaimenemiseen ja väliaineessa olevat raot voivat aiheuttaa seismisten aaltojen heijastumia. Tutkimuksen (Wu, ym. 1998) mukaan räjäytystärinöiden vaimeneminen on yhteydessä kallioperässä olevien rakojen määrään, minkä vuoksi optimaalisinta olisi sijoittaa tärinää mittaavat anturit kallioperän rakosuuntien myötäisesti, niin että mittaussijainnin ja louhoksen välillä olisi mahdollisimman vähän rakoja välissä.

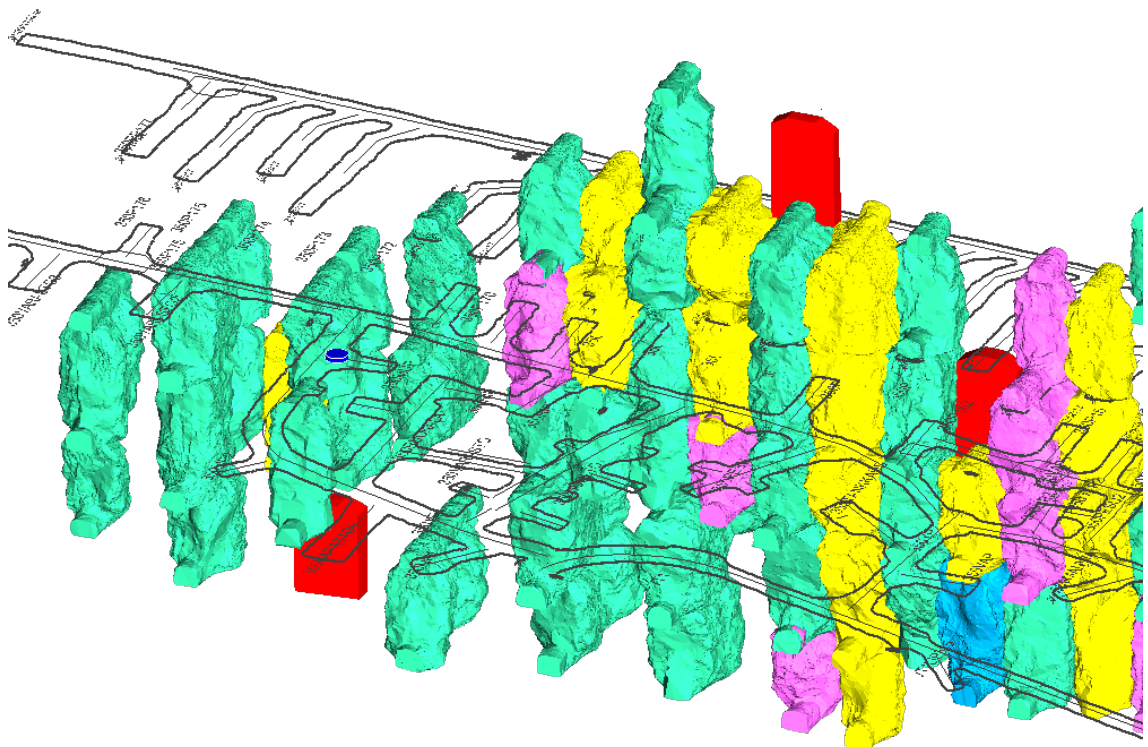
Räjäytystöitä käsittelevän oppaan (Vuolio ja Halonen 2012) perusteella, on kannattavaa sijoittaa tärinämittari niin, että vaimeneminen ei ole merkittävää ja että viiveellä havaittavia heijastuvia aaltoja ei syntyisi. Louhinnan aiheuttamien seuraaminen on siis suositeltavaa suorittaa louhoksen läheisyydessä maan alla.

4 Louhostutkimus

Tämä kappale käsittelee kokeellista tutkimusta, mikä suoritettiin Kittilän kaivoksella keväällä 2017. Tutkimus keskittyy kolmen maanalaisen louhoksen malmin tyypipitoisuuksien analysointiin ja niiden lähteiden arvioimiseen. Tutkimuksessa keskeisimpänä tavoitteena oli arvioida, onko nousun tyypillä ja panostussukan käytöllä merkitystä louhinnassa reagoimatta jääneisiin räjähdysaineisiin.

Louhokset 325L165_1 ja 375L162_1 louhitaan tavanomaista pitkäreikänousua hyödyntämällä ja louhos 450L173_1 louhitaan TRB-nousulla. PRN-louhoksista 325L165_1 panostetaan tavanomaisin menetelmin ja louhoksen 375L162_1 panostuksessa räjähdysaine pumpataan polyetyleenistä valmistettujen panostussukkien sisälle.

Alla olevassa kuvassa 16 on esitetty testilouhoksien (pun.) sijainnit 350-päätason kartoitusten ja ympärillä olevien louhosten suhteen. Kuvassa on myös havaittavissa sinisellä merkattu värinämittauksien mittauspiste, mistä kerrotaan tarkemmin tulevassa kappaleessa 4.4.



Kuva 16. Sijaintikuva testilouhoksista (pun.)

4.1 Louhosten räjäytysvaiheet

Testilouhokset louhitaan edellisen kappaleen periaatteiden mukaisesti ja taulukossa 11 on esitetty räjäytysvaiheiden tilavuudet sekä vapaan tilavuuden-% ja vapaan tilan käyttö-%.

Taulukon esittämät vapaat tilavuudet ovat laskettu tyhjän tilavuuden suhteesta louhittavaan tilavuuteen ja vapaan tilavuuden käyttö on laskettu vertaamalla räjäytystilavuutta kiven turpoamiskerroin huomioiden louhoksen kokonaistilavuuksiin.

Taulukon vapaan tilavuuden sarakkeesta voidaan todeta että räjäytysvaiheiden vapaiden tilavuuksien prosentuaaliset osuudet ovat riittävät.

Taulukko 11. Vapaan tilavuuden laskelmat testilouhoksille

Louhos	Vaiheistus	Tilavuus [m ³]	Tonnit	Perän tilavuus [m ³]	Nousun tilavuus [m ³]	Räjäytystilavuus [m ³]	Vapaa tilavuus [%]	Vapaan tilan käyttö [%]
325L165_1	Louhos	1455	4220	208	0	1455	13 %	118 %
	Latvat	377	1093	208	56	321	50 %	74 %
	Loput	1078	3127	585	87,5	991	43 %	80 %
375L162_1	Louhos	1705	4945	242	0	1787	12 %	119 %
	Latvat	435	1262	242	62,5	382	39 %	83 %
	Loput	1270	3683	677	93,75	1405	31 %	93 %
450L173_1	Louhos	1787	5181	197	0	1705	10 %	121 %
	Latvat	382	1108	197	0	373	46 %	80 %
	Loput	1405	4073	579	0	1176	40 %	83 %

4.2 Tutkimuslouhosten suunnittelu

4.2.1 Porauksen suunnittelu

Testilouhosten koosta johtuen leikkaukset jouduttiin asettamaan louhosmallin jalka- ja kattopuolien rajapintaan, jotta louhosten sisäisille leikkauksille saadaan riittävät leikkausvälit.

Taulukossa 12 esitellään testilouhoksien leikkausvälit. Nousut sijaitsevat kaikissa louhoksissa leikkauksella 2 ja noudattavat kappaleessa 3.5 esiteltyjä standardikaavioita. Huomioitavaa louhoksia verratessa on 325L165_1 louhosmallin kapeudesta johtuneet lyhyemmät leikkausvälit verrattuna muihin louhoksiin.

Taulukko 12. Testilouhosten leikkausvälit

Louhos	L1-L2 [m]	L2-L3 [m]
325L165_1	1,4	1,7
375L162_2	2,4	2,4
450L173_1	2,4	2,8

4.2.2 Panostuksen suunnittelu

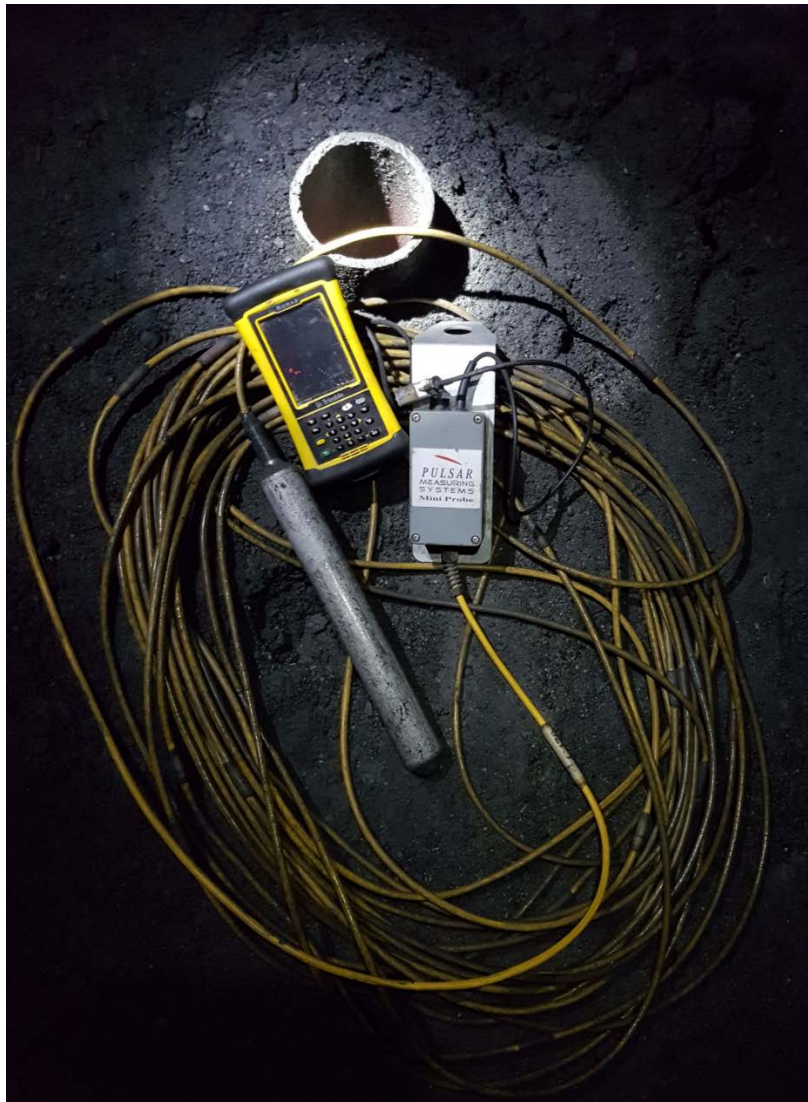
Louhosten identtisuuden vuoksi nallituksina käytettiin lähes samankaltaisia nallitusjärjestyksiä, lukuun ottamatta nousujen eri porakaavioita. Alla olevassa taulukossa 13 on esitelty suunnitellut räjähdysainemäärät leikkauksittain ja nousujen mukaan eroteltuna. PRN-louhoksissa latvaräjäytyksien nousun pituutena käytettiin 4 metriä, jotta loppuräjäytyksissä nousu olisi varmuuden vuoksi 6 metrin kannella.

Taulukko 13. Suunnitelman mukaiset räjähdysainemäärät (kg) esiteltynä leikkauksittain

Louhos	R.Vaihe	L1 [kg]	L2 [kg]	L3 [kg]	Nousu [kg]	Yht. [kg]
450L173_1	Latvat	214	237	210	340	1000
	Loput	878	682	856	820	3236
325L165_1	Latvat	195	251	264	466	1176
	Loput	904	641	871	581	2997
375L162_1	Latvat	224	268	207	466	1165
	Loput	829	516	855	581	2781

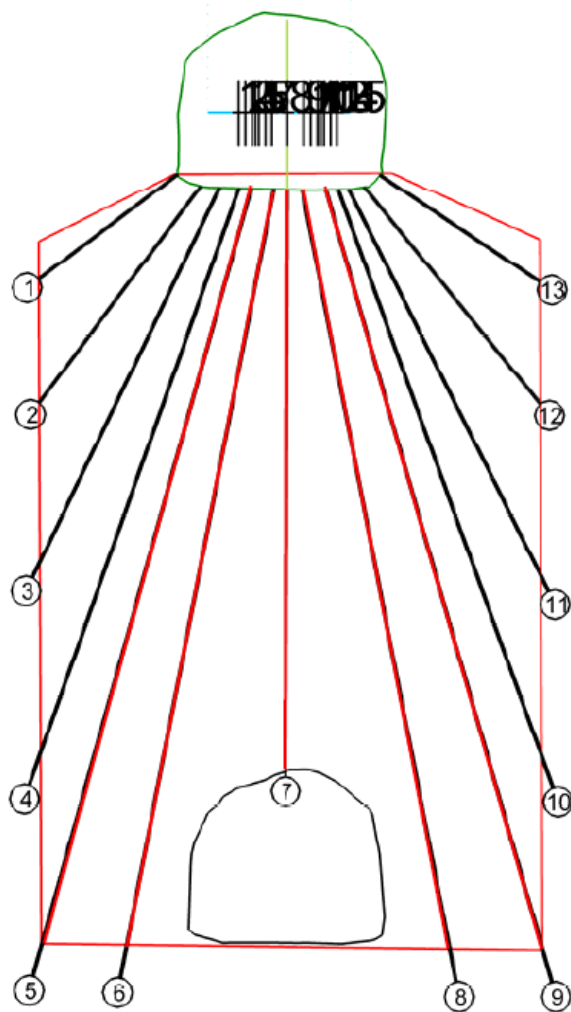
4.3 Reikäsuoruuksmittaukset

Reikäsuoruuksmittaukset suoritettiin kuvan 26 Pulsar Mini Probe -mittausanturilla ja Trimble kämmentietokoneella. Mittaukset perustuvat anturin kompassisuunnan ja kallistuksen vertaamiseen samalla kun anturia lasketaan syvemmälle porareikään kaapelissa näkyvien merkkien mukaisesti. Porareian mittapisteet luettiin joka toiselta metriltä ensimmäisestä metristä alkaen, kunnes anturin kallistus osoitti sen tulleen reiästä läpi tai osuen reiän pohjaan.



Kuva 17. Reikäsuoruuksmittauksessa käytetty välineistö

Testilouhoksissa on n. 20 m tasoväli ja kriittisin reikien taipuma arvioitiin olevan louhoksen pisimmillä kulmarei'illä tai nousun rei'illä. Aikataulullisista syistä ja käytössä olleista resursseista johtuen kuvan osoittamat poraviuhkojen ylemmät reiät jätettiin mittaamatta, niiden ollessa odotusarvollisesti vähemmän merkittäviä reikäsuoruuden kannalta. Ainoastaan louhosten kulmareiät sekä niiden väliset keskireiät mitattiin (merkattu punaisella).



Kuva 18. Esimerkki poraviuhka ja mitatut porareivät.

4.4 Tärinämittaukset

Tärinämittaukset suoritettiin Sigicom Infra –tärinämittauslaitteella (Kuva 19). Mittaukset suoritettiin vain yhdellä mittarilla ja tämä asennettiin 350-tason muuntamohuoneeseen langattoman verkkoyhteyden alueelle. Muuntamo valittiin asennuspaikaksi louhoksien suhteellisen keskeisen sijainnin ja kiinteän sijoituspaikan vuoksi. Huomioitavaa asennuspaikan valinnassa oli riittävän lyhyt välimatka arvioitaviin louhoksiin sekä mahdollisimman kohtisuorainen suunta louhoksien porareikiin nähden. Taulukossa 14 on esitelty eri suuntaiset etäisyydet mittauspisteestä testilouhoksien keskipisteeseen.



Kuva 19. Tärinämittaukseen käytetty mittalaitteisto.

Taulukko 14. Mittauspisteen etäisyydet louhosmallien mittauspisteiden puoleisten tahkojen keskipisteisiin.

Louhos	Hor.etäisyys [m]	Vert.etäisyys [m]	Suora etäisyys [m]
450L173_1	78	85	115
325L165_1	106	41	114
375L162_1	145	10	146

4.5 Aineistonkeruumenetelmät ja vaiheistukset

4.5.1 Lastaus



Kuva 20. Lastauksessa käytetty Sandvik Toro 517LH lastauskone

Louhenäytteiden otanta laadittiin keräämällä näytteet suoraan louhosräjäytyksien lastauksista. Jokaisesta louhosräjäytyksestä kerättiin normaalin lastauksen yhteydessä näytteeksi kahdessa vaiheessa yksi kuormallinen kiviä (30t). Ensimmäisen vaiheen näyte kerättiin, kun suunnitelluista tonnimääristä oli lastattu n.25 % ja toisen vaiheen näyte, kun n. 50 % oli lastattu.

Esimerkiksi 325L165_1 louhoksen latvaräjäytyksen lastausta seurattaessa huomattiin suuria lohkaraita, joiden pinnoilla oli selkeästi havaittavissa räjähdysainetta. Tästä kuva liitteessä 7.

Näytteenotto suoritettiin tuotannon aikataulujen puitteissa ja tästä johtuen louhoksien odotusajat räjäytyksestä lastaukseen vaihtelevat taulukon 15 mukaisesti. Räjäytyksien tärinöiden paikantamiseksi päivämäärien lisäksi ilmoitetaan myös onko räjäytys tehty yö- vai päivävuoron päätteeksi.

Taulukko 15. Testilouhoksien räjäytysajankohdat ja lastausvaiheet

Louhos	Latvaräjäytys	Lastauksen viive [pv]	Lastausvaiheet	Suun. Kok. Tonnit	Loppuräjäytys	Lastausviive [pv]	Lastausvaiheet	Suun. Kok. Tonnit
450L173_1	1.2 PV	1	342t, 600t	1108	9.2 PV	1	1020t, 2040t	4073
325L165_1	7.2 PV	1	310t, 550t	1093	13.2 YV	1	820t, 1620t	3127
375L162_1	11.3 PV	6	330t, 660t	1262	21.3 PV	6	920t, 1840t	3683

4.5.2 Näytteiden varastointi ja mobiilimurskaus

Lastauksesta kerätyt näytekasat varastoitiin kuvan 21 mukaisesti ulkona muoveilla ja kevytpeitteillä peiteltynä, jotta näytteet häiriintyisivät mahdollisimman vähän tuulen ja lumen vaikutuksista mobiilimurskausta odottaessa.

Kasat purettiin etukäteen suunniteltuun järjestykseen ja merkattiin sekaantumisien välttämiseksi. Kasojen varastointi tapahtui helmikuun ja maaliskuun aikana, jolloin lämpötilat pysyivät Kiistalassa ympäri vuorokauden alle 0 °C.



Kuva 21. Varastoidut louhekasat läjitysalueella

Louhekasat murskattiin mobiilimurskaimella 0-100 mm raekoolla, kaivinkoneen kauhalla kuvan 22 mukaisesti syöttämällä. Louhetta murskaimeen syötettäessä huomattiin että louhekasoissa oli isoja kuvassa 23 näkyviä lohkarkeit, joiden murskaamiseksi olisi tarvittu esirikotusta. Tästä johtuen raekoon valikoituminen korostui näytteenotossa.



Kuva 22. Louhekasojen mobiilimurskaus



Kuva 23. 375L165_1 latvaräjäytyksen 1.vaiheen näytetkasan murskauksesta pois jääneitä lohkkareita. ($D < 1\text{ m}$)

4.5.3 Näytteiden valmistelu

Murske homogenoitiin kaivinkoneen kauhalla työntämällä murskeen etupuolelle hihnalta pudonnut hienoaines kasan päälle ja möyhentämällä kaivinkoneen kauhalla kasanpinnalta. Homogenoiduista ja levitetyistä murskekasoista (kuvassa 24) kerättiin 30 litran murskenäytteet muovitynnnyreihin pistolapiota hyödyntämällä. Näytteet otettiin tasalaatuisesti eri puolilta kasaa, jotta otanta olisi kattava. Jokaisesta kasasta kerättiin yksi tynnyrinäyte (kuvassa 25).



Kuva 24. Homogenoitua mursketta



Kuva 25. Tynnyrinäytteet ja homogenoidut murskekasat.

Tynnyrinäytteistä muodostettiin laboratorioon lähettämistä varten 3 litran sankonäytteet, mitkä kerättiin kairanäytteen käsittelykauhalla tynnyriä pyörittämällä niin, että kauha täyttyy murskeesta. Sankonäytteet pakattiin ilmatiiviisti muovipusseihin sankojen sisällä, kuten esiteltynä kuvassa 26. Näytteitä muodostettaessa silmämääräistä emulsiota ei ollut havaittavissa.

Pienestä lähetyskoosta ja pulloissa tehtävien analyysien vuoksi suurimmat kappalekoot jäivät pois otannasta.



Kuva 26. Sankonäytteen kerääminen.

Liutusanalyysimenetelmien tarkkuutta ja 0-tilanteen arviointia varten kerättiin myös referenssinäyte sekä 0-näyte. Referenssinäytettä varten laboratorioon lähetettiin puhdasta emulsiomatriisia, jotta näytteen laatimisen tarkkuus on muiden näytteiden liutusanalyysiä vastaavalla tasolla.

0-näytteeksi kerättiin kaivoksen tuuletusnousujen porauksessa mekaanisesti syntynyttä rouhetta, mikä pakattiin muiden näytteiden tavoin ilmatiiviisti.

4.6 Liuotusanalyysit

Näytteiden analysointi suoritettiin ulkopuolisena laboratoriotoimeksiantona Ramboll Finland Oy:lle. Liuotusmenetelmänä käytettiin kumulatiivista ravistelu-uuttoa, missä kiintoainenäytettä ravistellaan 24h sarjoissa uuttoliuosta vaihtaen. Osauutoksista analysoitiin ammoniumtyppi ($\text{NH}_4\text{-N}$), nitraattityppi ($\text{NO}_3\text{-N}$), nitriittityppi ($\text{NO}_2\text{-N}$) sekä näiden summa kokonaistyyppi (Kok-N). Toimitetuista murskenäytteistä muodostettiin (l/s = 2) liuotusnäytteet, missä kiintoaineksen määrä oli 800g ja tislatus veden määrä 1,6 litraa. Analyysissä käytetty pullokokoko oli 2,0 l.

Reagoimattomien räjähdysaineiden laskelmat on laadittu summaamalla osauuttojen saadut kokonaistyyppi-pitoisuudet ja vertaamalla sitä ominaispanostusasteisiin. Ominaispanostusasteet ovat laskettu todellisia räjähdemääriä ja suunniteltuja, laimennukset huomiioon ottavia tonnimääriä. Yksittäisen näytteen koskiessa yhtä räjäytyksen lastausvaihetta, räjäytyskohtaiset palamattomien räjähteiden laskelmat lasketaan lastausvaihenäytteiden keskiarvoista.

Kumulatiivisten uuttojen vuoksi louhosnäytteen kokonaistypen (Kok-N) määrä lasketaan osauutosta seuraavan yhtälön 17 mukaisesti.

$$M_{Kok-N} = U_1 * V + U_2 * V + U_3 * V \quad (17)$$

Missä,

M_{Kok-N}	=	Typen määrä näytteessä [mg]
U_1, U_2, U_3	=	Osauuton Kok-N pitoisuus [mg/l]
V	=	Uutoissa käytetty tilavuus [l]

Tästä näytteen sisältämän räjähdysaineen massa (M_R) lasketaan Kemiitti 810 tiedetyn typpipitoisuuden ($\text{Kemiitti}_{N\%} = 28\%$) perusteella,

$$M_R = \frac{M_{Kok-N}}{\text{Kemiitti}_{N\%}} \quad (18)$$

5 Tulokset

5.1 Reikäsuoruuksmittaukset

Reikäsuoruuksmittaukset laadittiin testilouhoksien pitkistä kulmarei'istä sekä nousun rei'istä, jotta porauksen toteuman vaikutukset tuloksien virhelähteisiin olisivat selkeästi esiteltävissä. Mittauksista laaditut mallit ovat esitetty liitteessä 4.

TRB-louhoksessa kulmareikien taipumat pysyivät keskimäärin 0,4-0,7 metrin sisällä suunnitellusta 25 metrin reikäpituuksillakin eikä räikeitä poikkeamia esiintynyt. TRB-nousun keskimmaisella leikkauksella avausreikien ympärillä olevat nousun reiät 4kpl olivat molemmin puolin avausreikää puhjenneet 0,3 m ja 0,2 m reikäväleillä, mitkä poikkeavat suunnitellusta 0,7 metrin reikävälistä.

PRN-louhoksissa kulmareikien taipumien vuoksi reikien väliset edut muuttuivat suunnitelluista huomattavasti enemmän kuin TRB-louhoksessa. 325L165_1 louhoksen leikkauksen 2 kulmareiät olivat taipuneet aiheuttaen leikkausvälien kaventumista leikkauksen 3 suhteen sekä kasvamista leikkauksen 1 suhteen. Kuten kuvasta 27 huomataan, 325L165_1 louhoksen reikien väliset etäisyydet ovat kapeimmillaan 1,2 metriä ja suurimmillaan 3,4 metriä.



Kuva 27. Esimerkki 325L165_1 louhoksen kulmareikien väliset edut (m).

5.2 Panostuksen toteutus

Panostuksien yhteydessä Kemiitti 810 – räjähdysaineelle suoritettiin tiheysmittauksia, missä räjähdysaineen tiheyden muutoksen perusteella arviotiin räjähdysaineen herkistymistä. Koe suoritettiin täyttämällä näyteastia reikään pumpattavalla räjähdysaineella ja tasaamalla räjähdysaineen pinta astian reunojen tasolle. Tämän jälkeen näyteastia punnittiin ensimmäisen kerran, minkä jälkeen näytteen annettiin rauhassa herkistyä ja paisua, kunnes n. tunnin kuluttua näytteen pinta tasattiin uudelleen reunojen tasolle ja punninta suoritettiin uudelleen. Joistakin testilouhoksista otettiin samanaikaisesti 2 näytettä ja osasta 1. Kokeissa käytettävän näyteastian tilavuus oli 192 ml. Räjähdysaineen lämpötiloja ei dokumentoitu.

Alla olevan taulukon 15 muuntuneiden tiheyksien mukaan kaikkien näytteiden räjähdysaineet herkistyivät räjähtyksen kannalta optimaaliselle tasolle.

Tämän lisäksi panostuskenttä tarkistettiin ohjelmointien yhteydessä sekä perään pudonneet räjähdysaineiden roiskeet kerättiin pois virhelähteiden vähentämiseksi.

Taulukko 15. Testilouhoksissa panostetun Kemiitti 810 räjähdysaineen kaasuuntumistiheydet

Louhos	Paino [g]	Tiheys [kg/dm ³]	Paino (+1h) [g]	Tiheys [kg/dm ³]
450L173_1				
Latvat	249	1,30	203	1,06
Loput				
Kuppikoe 1	262	1,36	213	1,11
Kuppikoe 2	265	1,38	207	1,08
325L165_1				
Latvat				
Kuppikoe 1	257	1,34	221	1,15
Kuppikoe 2	251	1,31	211	1,10
Loput	245	1,28	215	1,12
375L162_1				
Latvat	262	1,36	202	1,05
Loput				
Kuppikoe 1	290	1,51	226	1,18
Kuppikoe 2	278	1,45	220	1,15

Räjäytyksissä käytetyt räjähdysainemäärät tarkastettiin panostusraporteista, jotta voidaan laskea räjäytyksissä käytettävät ominaispanostusasteet. Taulukossa 16 on esitelty toteutuneet räjähdysainemäärät leikkauksilla ja nousuilla eroteltuna. Puutteellisesta raportoinnista johtuen kaikkien räjäytyksien raporteista ei ollut saatavissa panostetun räjähdysaineen määriä, jolloin räjäytyksen yhteenlasketut räjähdysaineet on laskettu räjäytyksen ilmoitetusta kokonaismäärästä.

Useimmissa raporteissa oli ilmoitettu tulppauksena ja pohjapanoksina käytetyt räjähdysainepatruunoiden määrät. Tulppauksena käytettyjä patruunoita käytettiin 4-7 kpl 70mm Kemix A-patruunoita. Nämä ovat taulukossa laskettu yhteen pumpatun Kemiitti 810 emulsioräjähdysaineen määrien kanssa. Taulukossa oikeanpuoleisimmassa sarakkeessa on laskettu toteutuneiden panostettujen räjähdysaineiden määrien muutos suunniteltuihin määriin.

Panostusraporteista kävi ilmi että TRB-louhoksen todelliset räjähdysainemäärät olivat molemmissa räjäytyksissä suuremmat kuin suunnitelman mukaiset määrät.

325L165_1 louhoksen molempien louhosräjäytyksien todelliset räjähdysaineiden määrät olivat suunniteltuja määriä pienemmät. Panostusraporteissa oli mainittu rakoilevat ja vuotavat porareivät, minkä vuoksi panostaja on panostanut molemmissa räjäytyksissä leikkauksella yhdet porareivät pelkillä patruunoilla. Patruunoilla panostettujen reikien räjähdysainemääriä ei ollut raportoitu.

375L162_1 louhoksen todelliset räjähdysaineiden määrät olivat TRB-louhoksen tavoin suurempia, mutta latvaräjäytyksen raportissa ei ollut raportoitu ensimmäisellä leikkauksella panostettuja räjähdysaineita. Louhoksen loppuräjäytyksen leikkauksella 2 kivi oli raportin mukaan huonoa, minkä vuoksi reikiä ei ole saatu panostettua pohjia myöten.

Taulukko 16. Testilouhoksien toteutuneet räjähdysainemäärät [kg]

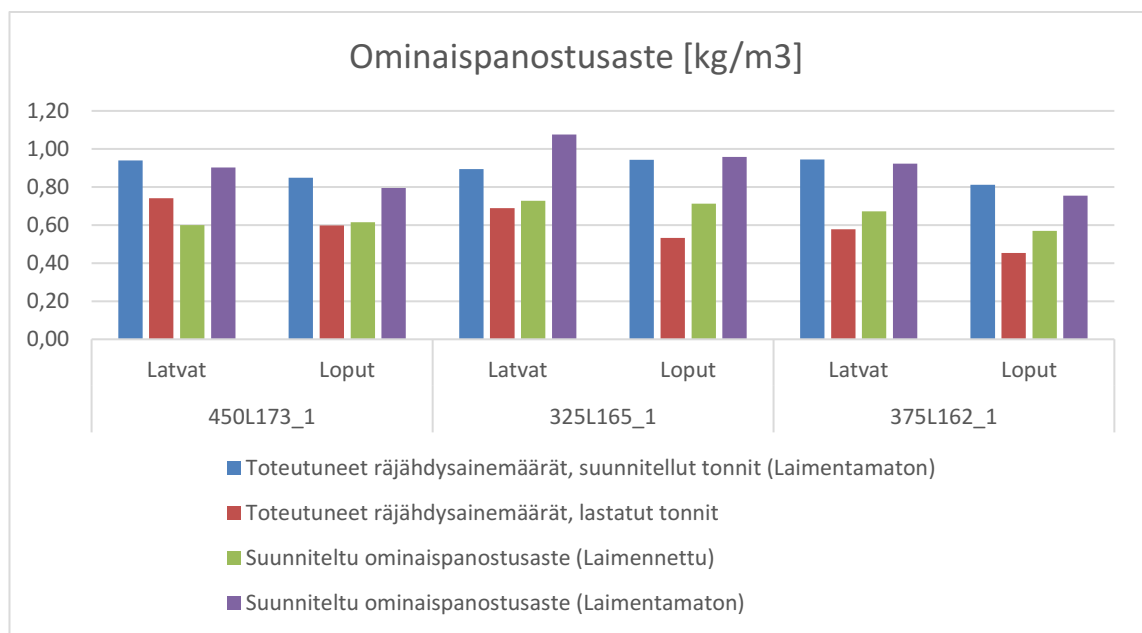
Louhos	R.Vaihe	L1 [kg]	L2 [kg]	L3 [kg]	Nousu [kg]	Yht. [kg]	Δ[kg]
450L173_1	Latvat	239	264	245	293	1041	40
	Loput	925	732	946	851	3454	218
325L165_1	Latvat	ei merk.	207	249	400	978*	-198
	Loput	573**	646	891	ei merk.	2951*	-46
375L162_1	Latvat	ei merk.	186	185	547	1193*	29
	Loput	892	602	913	582	2988	207

* = Laskettu ilmoitetusta kokonaismäärästä

** = Ei tietoja patruunoilla panostetusta reiästä

Louhinnan mahdollisten räjäytyksien jälkeisten sortumien vuoksi ominaispanostusasteiden lähteinä käytettiin sekä suunniteltuja louhemääriä arvioituina laimennuksina että louhoksista lastattuja, todellisia tonneja.

Kuvasta 28 voidaan havaita että louhoksien suunnitellut ominaispanostusasteet laimentamattomilla tonnimäärillä on hyvin korkea suhteessa muihin ominaispanostusasteisiin. PRN-louhoksien ominaispanostusaste laskee loppuräjäytyksissä, kun TRB-louhoksen ominaispanostusasteiden muutokset ovat maltillisempia, tämä selittyy nousujen erillisten louhintavaiheiden kasvattamalla epätarkkuudella. Taulukosta huomataan myös että 450L173_1 ja 325L165_1 louhoksien latvaräjäytyksien todellisista tonneista lasketut ominaispanostusasteet ovat suunniteltuja tonneja korkeammat. Tämä johtuu suunniteltua pienemmistä laimennuksista latvaräjäytyksissä.



Kuva 28. Räjäytyksien ominaispanostusasteet

5.3 Tärinämittaukset

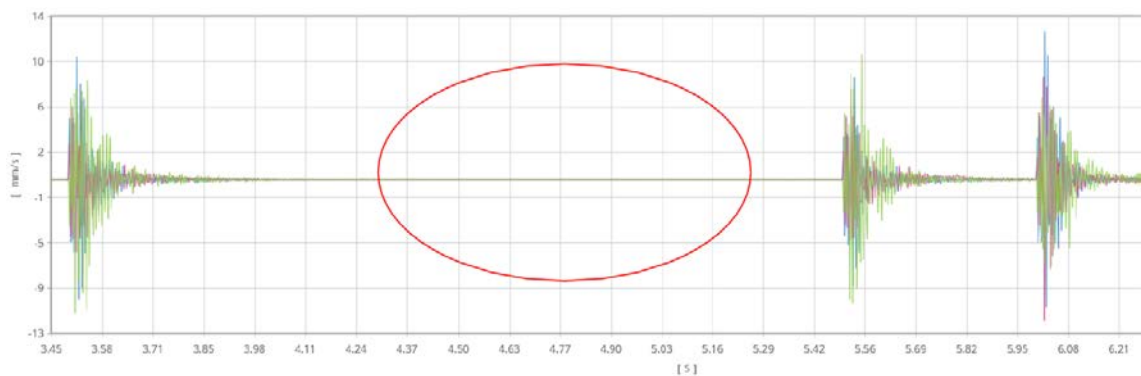
Tärinämittauksissa saatujen tuloksien mukaan tärinää aiheuttamattomia reikiä sijaitsi pääosin nousuissa sekä PRN-louhoksien louhosleikkauksilla. Tärinöiden perusteella yksittäiset reiät ovat selkeästi eroteltavissa räjäytyksen reikien hidastusvälien ollessa vähintään 50 ms. Tämän jälkeen yksittäisten porareikien tuottamat tärinät sekoittuvat niin että yksistään kolmiaksaalista heilahdusnopeuden muutosta arvioimalla selkeitä poikkeamia ei voitu havaita. Poikkeamien havaitsemattomuus voi johtua onnistuneesta räjäytyksestä tai mittaussijainnin vaikutuksista havaitsemistarkkuuteen.

Taulukossa 17 on esitelty poikkeamahavaintoja tuottaneet nousut ja louhosleikkauksilla olevat reiät (+)-merkillä eroteltuna sekä laskettu hidastusaikojen perusteella näiden teoreettiset palamattomien räjähteiden osuudet suhteessa räjäytyksen kokonaisräjähdysainemääriin.

Taulukko 17. Tärinämittauksen perusteella palamattomien räjähdysaineiden osuudet.

Räjäytys	Selkeästi tärinää tuottamattomien reikien lukumäärä (Nousu + Louhosleikkaukset)	Poikkeamareikien yhteenlaskettu räjähdemäärä [kg]	[%]
450L173_1			
Latvat	2+0	62,5	6 %
Loput	2+0	156,5	5 %
325L165_1			
Latvat	4+1	158	16 %
Loput	4+1	224	8 %
375L162_1			
Latvat	4+2	265,2	22 %
Loput	6+0	210	7 %

TRB-louhoksien tärinät vaikuttivat yksiselitteisiltä. Tärinöitä tuottamattomat reiät hidasteajoiltaan 5500 ms ja 6000 ms (kuvassa 29) olivat reikäsuoruuksmittauksien perusteella 0,3m etäisyydellä viereisistä nousun rei'istä, jolloin reikään panostetun räjähdysaineen kriittisen tiheyden ylittyminen tai jopa porareian sortuminen on mahdollista. Huolimatta siitä että TRB-louhoksen räjäytyksissä saatiin poikkeavia havaintoja vain kahdesta nousun reiästä, suhteellisen suuren laskennallisen räjähdysainemäärän osuuden syynä on nousun suuri panostuspituus verrattuna PRN-louhoksiin.

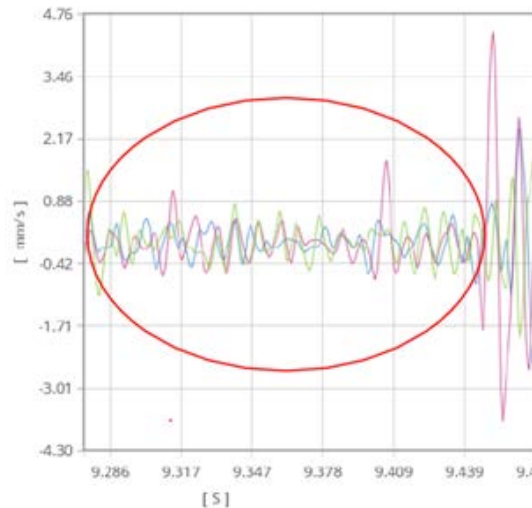


Kuva 29. 450L173_1 Loppuräjäytyksen tärinädata 5440–6180 ms.

PRN-louhoksien nousuissa selkeitä havaintoja oli runsaasti. Tämän voi perustella nousujen tiheillä porakaavioilla, missä panostettuja reikiä on samassa tilavuudessa TRB-nousun 10 reiän sijaan 15. PRN-nousun avausreikien sisäinen vapaa tilavuus on myös pienempi sekä jakautuneempi kuin TRB-nousussa. PRN-louhoksissa nousun reikien lisäksi oli selkeitä havaintoja mahdollista tehdä nousun reikien lisäksi myös louhosleikkauksilta ennen hidastevälien lyhentymistä.

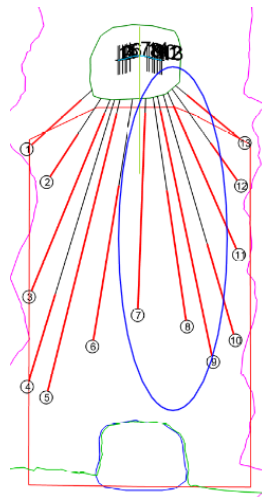
Kuvassa 30 on esitelty 375L162_1 louhoksen viimeisen räjäytysvaiheen yhdellä tärinämittarilla tallennettua tärinädataa 9200-9400 ms ajanhetkeltä. Kuvassa on eroteltavissa kolmiaksisiaalisien tärinän kaikki komponentit, pituussuuntainen (vihr.), pystysuuntainen (sin.) ja vaakasuuntainen (pun.). Kuvan 9300ms ja 9400ms hidasteajan hetkillä on havaittavissa kaksi vaakasuuntaisen aallon iskupiikkiä, mutta tärinän luonne ei ole verrattavissa muiden nallien selkeisiin tärinöihin. 9400ms hidasteajalla olevan reiän panospituus on 15,5 metriä ja nallituksessa on käytetty pohjanallin lisäksi myös pintanallia, joten olisi odotettavaa että nallin suunnitellusta laukeamisesta ja reiän räjähtämisestä syntisi huomattavampi heilahdusnopeuden muutos. Nämä hidasteajat ovat kuitenkin epä-

selviä, eikä niitä voi tulkita tärinää tuottamattomina reikinä. Tuotettu tärinä voi olla vai-
mentunut nousun louhinnasta heikentyneen kiven vuoksi tai kyseinen reikä on voinut olla
suurimmaksi osin tuhoutunut nallin lauetessa.



Kuva 30. 375L162_1 Loppuräjähdyksen tärinädata 9200–9400 ms

Panostusraportteja analysoimalla vaikutti myös mahdolliselta että esimerkiksi
375L162_1 -loppuräjähdyksen panospituuksista olisi voinut aiheutua selkeitä typpipääs-
töjä. Kuvassa 31 on havaittavissa kyseisen räjäytyksen ensimmäinen leikkaus, mistä
voidaan huomata että reiät nro.8 ja 9 panospituudet ovat hyvin lähekkäin toisiansa. Nal-
lituksessa reikien välinen hidastusväli on 450 ms, mistä johtuen reikä 8 on voinut rikkoa
kiveä reiän 9 ympäriltä ja näin estää sen räjähdysaineiden reaktiot.
Tärinämittaustiedon perusteella molemmista rei'istä on kuitenkin havaittavissa selkeät
heilahdusnopeuden muutospiikit, minkä perusteella voidaan olettaa että ainakaan koko
reikä 9 ei todennäköisesti ole jäänyt räjähtämättä.



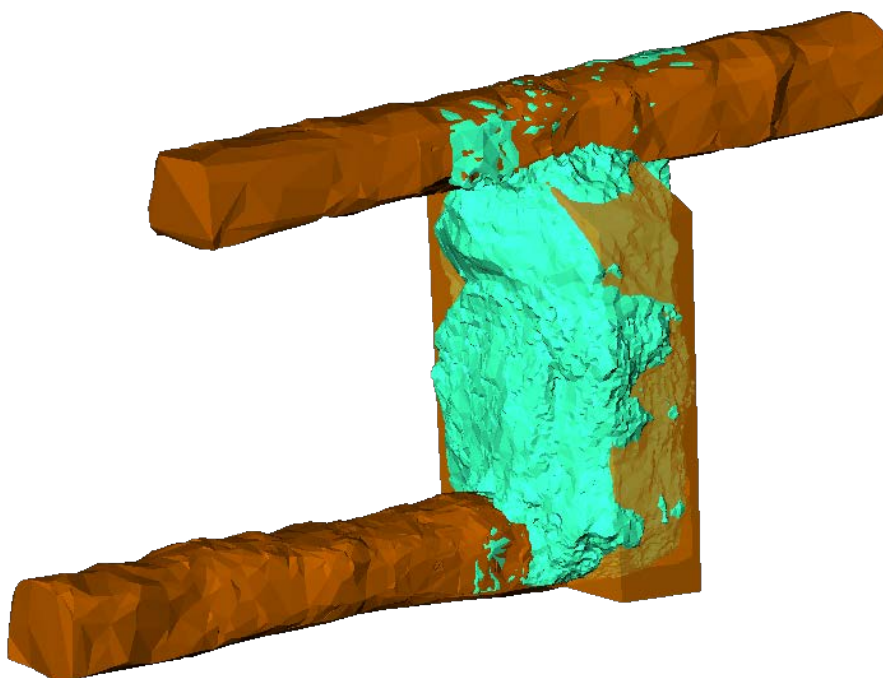
Kuva 31. 375L162_1 Loppuräjähdyksen L1 leikkauskuva ja kriittiset panospituudet.

5.4 Laserskannaukset

Louhoksen tyhjäksi lastaamisen jälkeen louhitusta tilasta laserskannattiin 3d-malli (ku-
vassa 32), jotta louhinnan onnistumista on mahdollista analysoida louhitun tilan perus-
teella.

Saatujen louhoscannauksien perusteella testilouhoksien louhinnoista saatiin seuraavan
taulukon 18 mukaiset tonnit ja laimennukset. Kiven tiheytenä on käytetty $2,9 \text{ t/m}^3$. Lou-
hoksista laaditut laserskannausmallit ovat nähtävissä liitteissä.

Kaikissa louhoksissa tapahtui louhosmallin ulkopuolisia laimennuksia jalka- sekä katto-
puolella leikkauksia. Louhoksissa tapahtunut alilouhinta on pääosin peräisin louhosten
alakulmista ja hartioista.



Kuva 32. Esimerkki laserskannaus louhoksesta 450L173_1.

Taulukko 18. Laserskannauksien perusteella louhitut tonnit

Louhos	Vaihe	Suunniteltu louhe- määrä [t]	Lastattu louhe- määrä [t]	Laserskannauksen perus- teella laskettu louhemäärä [t]
450L173_1	Latvat	1666	1405	
	Loput	5257	5778	
	Koko louhos	6923	7183	7159
325L165_1	Latvat	1615	1421	
	Loput	4205	5548	
	Koko louhos	5820	6969	7288
375L162_1	Latvat	1730	2063	
	Loput	4887	6591	
	Koko louhos	6618	8654	9202

5.5 Liuotusanalyysit

5.5.1 Louheen typpipitoisuus

Laboratorioon lähetettyjen näytteiden sisältämät typen määrät saatiin laskemalla erillisuuttojen sisältämät kokonaistyppipitoisuudet (Kok-N) kumulatiivisesti yhteen. Ammoniumtypen ja nitraatti- sekä nitriittitypen pitoisuuksia ei tarkemmin hyödynnetty laskelmissa.

Liuotusanalyysien raakatulokset ovat esiteltynä liitteessä 6 ja niiden pohjalta on laadittu seuraavassa taulukossa 19 esitetyt laskelmat näytteiden sisältämistä typpimääristä. Näytteiden välisistä eroavaisuuksista on myös mahdollisten virhelähteiden huomioimiseksi laskettu räjäytyksien sisäisten näytteiden väliset eroavaisuudet. Taulukon $\Delta[\%]$ -merkki kuvaa näytteen lastausvaiheen typpimäärän muutosta ensimmäisen vaiheen näytteeseen. Negatiivinen luku tarkoittaa typen määrän vähenemistä ensimmäisestä näytteestä ja positiivinen luku typen määrän kasvamista lastauksen edetessä.

Kokonaistypen määrien perusteella on laskettu laskennalliset näytteiden sisältämät räjähdysaineiden määrät, joiden perusteella tehtiin kokonaisvaltaisemmat laskelmat räjähdysaineiden reagoimattomista osuuksista räjäytyksissä.

Taulukko 19. Liuotusanalyysin typpimäärät

Louhos	Näyte	Typeä näytteessä [g]	$\Delta[\%]$
450L173_1	Latvat N1	0,062	
	Latvat N2	0,020	-68 %
	Loput N1	0,028	
	Loput N2	0,026	-9 %
325L165_1	Latvat N1	0,083	
	Latvat N2	0,052	-37 %
	Loput N1	0,022	
	Loput N2	0,012	-46 %
375L162_1	Latvat N1	0,030	
	Latvat N2	0,100	236 %
	Loput N1	0,026	
	Loput N2	0,023	-15 %
0-näyte		0,00434	
Referenssinäyte		1,347	

Liutusanalyysin näytteiden sisältämän typen perusteella tehtiin myös taulukon 20 esittelemät laskelmat rikastamolle kulkeutuvan louheen typpipitoisuuden arvioimiseksi. Räjätyskohtaiset typpipitoisuudet ovat laskettu suoraan näytteiden kiintoainemäärän (800g) suhteen, eikä niissä ole huomioitu louhoksien kokonaiskivimääriä. Laskelmissa ei myöskään ole huomioitu lastauksen ja läjityksen aikaista typen liukenemista tai vapautumista.

Keskimääräistä louhoksien typpipitoisuutta laskettaessa on otettu huomioon räjäytysten louheiden väliset mittasuhteet, koska loppuräjäytyksistä peräisin olevaa louhetta on suhteellisesti enemmän kuin latvaräjäytyksistä peräisin olevaa louhetta.

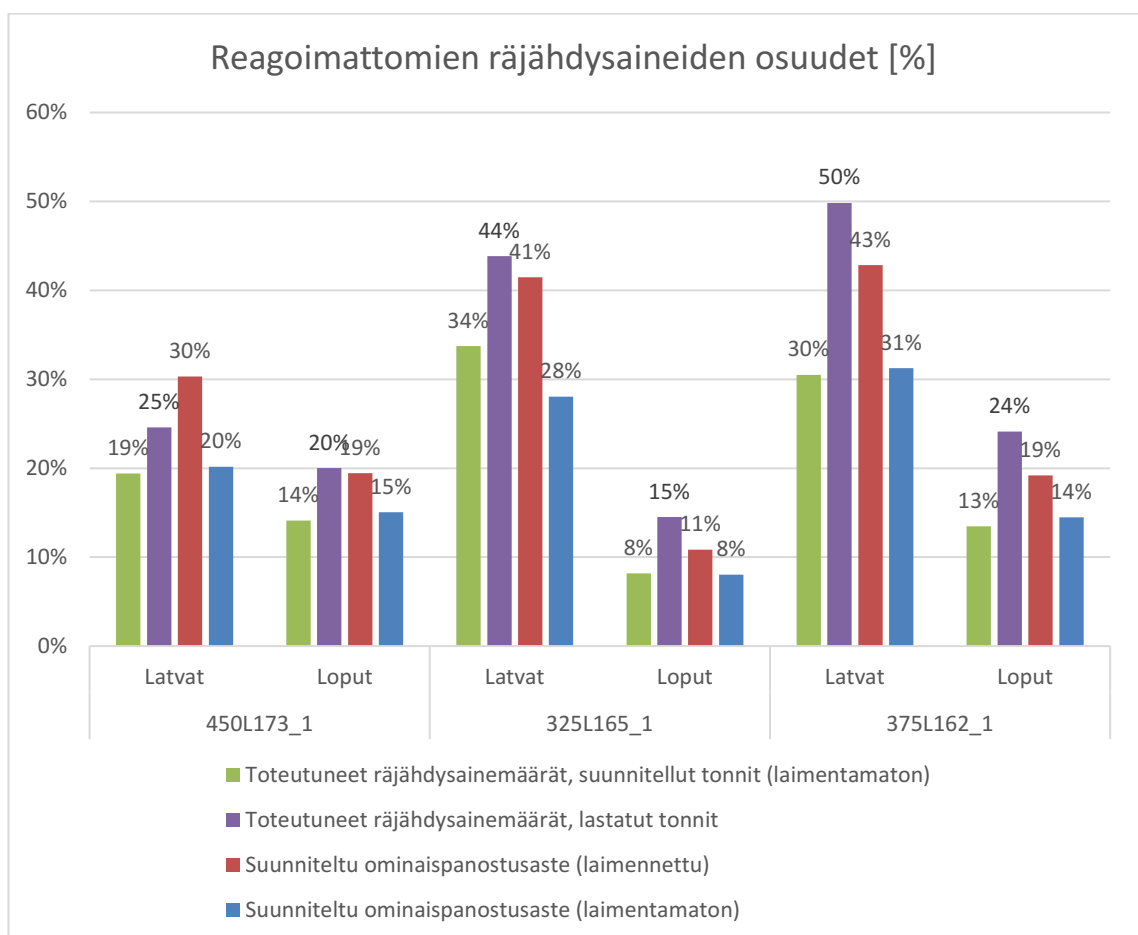
Taulukko 20. Louheen typpipitoisuus.

Louhos	Latvaräjätys [g/t]	Loppuräjätys [g/t]	Keskimääräinen pitoisuus [g/t]
450L173_1	51	34	36,9
325L165_1	85	22	34,4
375L162_1	81	31	42,5
Louhoksien typpipitoisuuden keskiarvo [g/t]			38,0

5.5.2 Reagoimattomien räjähdysaineiden laskelmat

Erillisistä lastausvaiheiden näytteiden sisältämien typpimäärien keskiarvoista laadittiin laskelmat, jotka ovat esitettynä kuvassa 33. Laskelmat kuvaavat palamattomien räjähteiden osuutta räjäytyskohtaisesti.

Jotta voidaan verrata louhinnan toteuman kannalta laskennallisia reagoimattomien räjähdysaineiden osuuksia, laskelmat tehtiin eri lukuihin perustuvia ominaispanostusasteita käyttämällä. Huomattavaa on että laskennalliset palamattomien räjähdysaineiden osuudet vaihtelevat käytettävän ominaispanostusasteen ja näytteen typen määrän mukaan.



Kuva 33. Liutustuloksien perusteella saadut räjäytysvaihekohtaiset palamattomien räjähteiden osuudet.

6 Tuloksien käsittely

6.1 Reagoimaton räjähdysaine ja louheen tyypipitoisuus

Kaikkien louhosräjäytyksien reagoimattomien räjähdysaineiden keskiarvoinen määrä todellisilla räjähdysainemäärillä ja todellisilla louhemäärillä oli n. 30 %. On odotettavaa että näin suuren osuuden jäädessä reagoimatta, viitteitä louhinnan selkeästä epäonnistumisesta olisi havaittavissa myös louhinnan muilla analysointimenetelmillä. Louhoskannauksien ja tärinämittauksien perusteella louhinta on kuitenkin selkeästi ristiriidassa liuotustuloksien kanssa. Louhosten välisten näytteenottomenetelmien yhdenmukaisuuden vuoksi liuotustuloksia on silti mahdollista pitää keskenään vähintään suuntaa antavina. Huomioitavaa tuloksissa on tärinämittauksen perusteella tehtyjen reagoimattomien räjähdysainemäärien verrannollinen taso (5-20 %) muiden tutkimuksien kanssa sekä louheen suoran tyypipitoisuuden laskennan riippumattomuus eri ominaispanostusasteiden perustana olevista tonnimääristä.

Liuotustuloksien perusteella laskennallisen reagoimattomien räjähdysaineiden määrät vaihtelevat riippuen käytetäänkö laskelmissa ominaispanostusastetta mikä perustuu louhoksen suunniteltuihin tai lastattuihin tonneihin. Palamattomien räjähteiden laske-
miseksi näytteiden sisältämiä tyypimääriä verrattiin kuvissa 36 ja 41 esiteltujen ominaispanostusten kanssa.

Räjäytyksien laskelmissa käytettävät ominaispanostusasteet ovat alhaisempia, jos irronnutta kiveä on suunniteltua enemmän. Suuremman kivimäärän myötä alhaisemmalla ominaispanostusasteella laskennalliset palamattomien räjähteiden suhteelliset osuudet kasvavat. Näin laskelmissa käytettävän ominaispanostusasteen muutos vaikuttaa liutosanalyysistä saataviin tuloksiin seuraavan sivun taulukon 21 mukaisesti.

Taulukossa on esitetty laskelmissa käytettävän ominaispanostuksen merkitys louhoksen 450L173_1 latvaräjäytyksen reagoimattomien räjähdysaineiden osuudelle. Taulukon 100 % ominaispanostusasteen luku on laskettu toteutuneista räjähdysainemääristä ja lastatuista tonneista. Ominaispanostusasteen merkitys räjähdysaineisiin tässä tapauksessa käsittelee vain tuloksien laskentamenetelmää, eikä missään tapauksessa pidä yhdistää todellisiin ominaispanostusasteen muutoksiin.

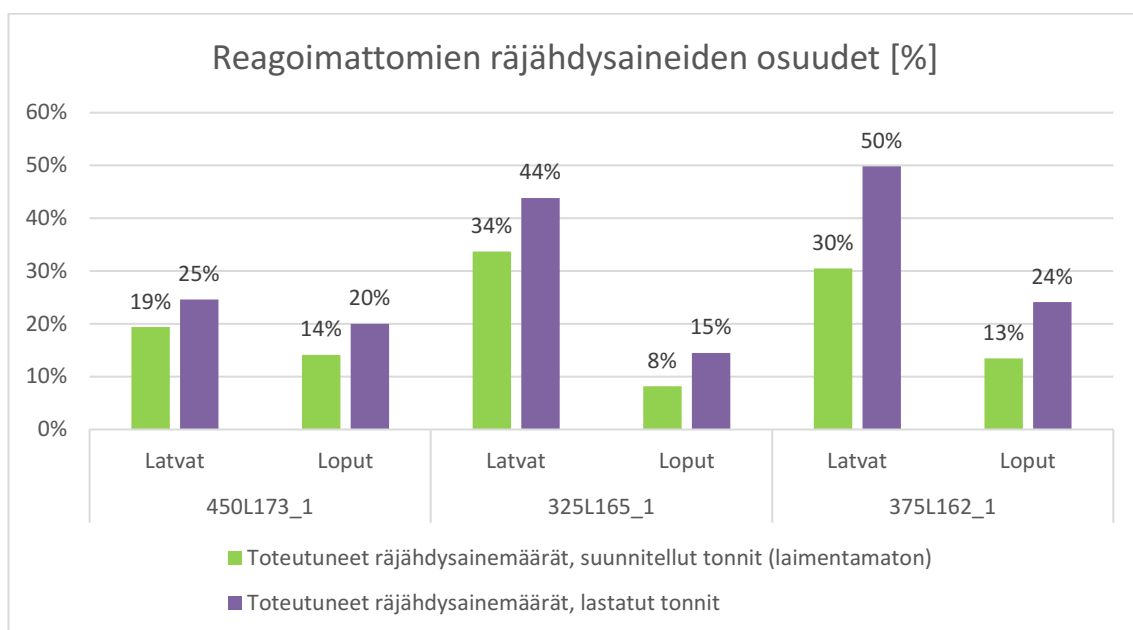
Taulukko 21. Laskelmissa käytettävän ominaispanostusasteen muutoksen vaikutukset räjähdysaineen määrän laskentamenetelmässä.

Ominaispanostusasteen muutos todellisesta [%]	Reagoimaton R-aine[%]	Ominaispanostusaste [kg/m ³]
85 %	29 %	0,63
90 %	27 %	0,67
95 %	26 %	0,70
100 %	25 %	0,74
105 %	23 %	0,78
110 %	22 %	0,81
115 %	21 %	0,85
120 %	20 %	0,89

Huolimatta tutkimuksen näytteenottomenetelmien raekoon valikoitumisen odotettavista vaikutuksista saatuihin tuloksiin, jos typen odottaa olevan tasaisesti jakautuneena koko räjäytyksen lastattaviin kiviin, on laskennallisen ominaispanostusasteen vähenemisen seurauksena reagoimattomien räjähdysaineiden osuudet todennäköisesti liioittelevia.

Tämän vuoksi räjähdysaineesta peräisin olevan typen voisi odottaa sijaitsevan epätasaisesti jakautuneena porareikien lähellä sijaitsevassa kivimateriaalissa. Näin laskelmissa saadaan realistisempia tuloksia, kun ominaispanostusasteen kivimäärinä käytetään räjäytysmallin laimentamattomia tonneja.

Alla olevassa kuvassa 34 on esitelty toteutuneiden räjähdysaineiden ja eri louhetonnien perusteella lasketut reagoimattomien räjähdysaineiden osuudet testiräjäytyksille.



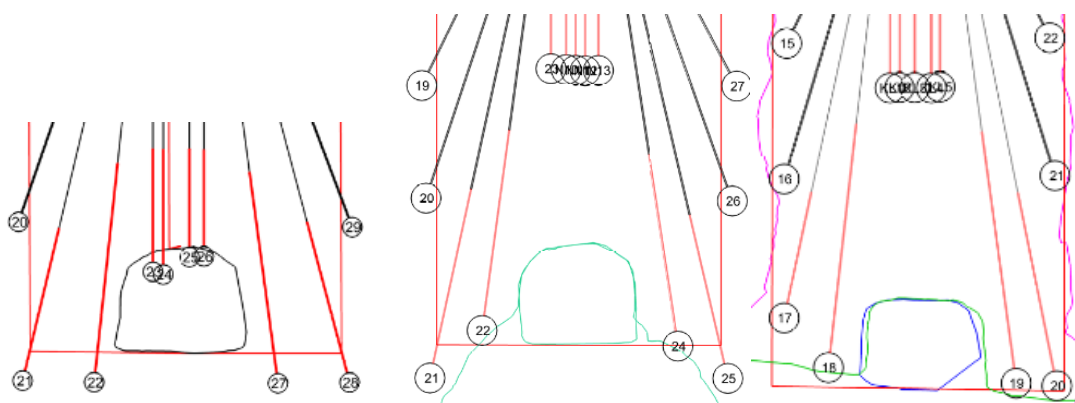
Kuva 34. Reagoimattomien räjähdysaineiden osuudet

Liutusanalyysillä saatujen tuloksien perusteella palamattomien räjähteiden osuuksissa on räjäytysvaiheissa selkeä trendi. Kaikissa louhosten loppuräjäytyksissä oli latvaräjäytyksiä pienemmät typpipitoisuudet, minkä voi yhdistää suurempiin räjäytystilavuuksiin ja latvaräjäytyksiä alhaisempiin todellisiin ominaispanostusasteisiin.

Arvioitaessa liutustuloksia, voidaan olettaa että latvaräjäytyksien näytteiden perustavanlaatuisuus on pienemmistä räjäytystilavuuksista johtuen parempi. Esimerkiksi 450L173_1 louhoksen latvaräjäytyksessä lastauksessa kerättävä näyte kattaa n. 4,2 % konaiskivimäärästä, kun loppuräjäytyksestä kerätty louhemäärä on n. 1 % räjäytyksen konaiskivimäärästä.

Tämän lisäksi myös latvaräjäytyksien räjäytysgeometria on louhosten välillä paremmin vertailtavissa. Kuvissa 35, 36 ja 37 esitellään latvaräjäytyksien keskileikkauksien panospituudet. Panospituuksien vähemmällä keskinäisillä eroilla olisi odotettavaa että virhelähteiden esiintyminen on vähäisempää. Vaikka PRN-louhoksien nousuista on louhittu latvaräjäytysvaiheessa jo 10 metriä, ovat nousujen suhteelliset pituudet latvaräjäytyksissä kaikissa n. 5 metriä.

Loppuräjäytyksissä nousun pituuksien erot korostuvat ja tämän voi nähdä keskinäistä vertailua haittaavana tekijänä. TRB-louhoksessa loppuräjäytyksen nousun panospituus oli 12 metriä, kun PRN-louhoksissa nousun panospituus oli 5 metriä. Tämän voi nähdä TRB-louhoksen loppuräjäytyksen räjähdysaineiden määriä nostavana tekijänä verrattuna PRN-louhoksiin.



Kuvat 35, 36 ja 37. Testilouhoksien (450L173_1 vas., 325L165_1 kesk., 375L162_1 oik.) latvaräjäytyksien keskileikkauksen panospituudet.

Riippumatta kummalla kuvan 41 luvuista arvioidaan koeräjäytyksissä reagoimatta jääneitä räjähdysaineita erot TRB-louhoksen ja PRN-louhoksien latvaräjäytyksien välillä voi nähdä melko selvinä. Liutustuloksien mukaan TRB-louhoksen latvaräjäytyksessä n. 19–25 % räjähdysaineesta jäi reagoimatta, kun PRN-louhoksista ilman panostussukkaa n. 34–44 % ja panostussukalla n. 30–50 % räjähdysaineesta jäi reagoimatta. Myös louheen typpipitoisuuden suhteen tulokset ovat johdonmukaisia edellisten suhteen, TRB-louhoksen latvaräjäytyksessä louheen typpipitoisuus oli 51 g/t ja PRN-louhoksissa ilman panostussukkaa louheen typpipitoisuus oli 85 g/t sekä panostussukalla 81 g/t.

Räjäytysvaiheiden lisäksi myös näytteenoton lastausvaiheistuksella oli vaikutusta typpipitoisuuteen. Kuudesta räjäytyksestä viidessä ensimmäisen vaiheen lastausnäytteellä oli suuremmat pitoisuudet kuin toisen vaiheen näytteessä. Tämä voidaan yhdistää siihen että ensimmäisen vaiheen louheessa on suhteellisesti enemmän noususta peräisin olevaa kiveä ja keskellä louhosta louhe on enemmän sekoittunut. 375L162_1 louhoksen latvaräjäytyksen näytteissä oli havaittavissa selkeä poikkeama tästä trendistä, toisen lastausvaiheen näyte sisälsi yli 3 kertaa enemmän typpeä kuin ensimmäisen vaiheen näyte. Ottamalla huomioon tärinämittauksella saadut havainnot, kyseisessä räjäytyksessä havaittiin nousun tärinättömien reikien lisäksi myös kaksi panostettua reikää louhosleikkauksilla. Kasvanut pitoisuus on perusteltavissa virhelähteellä, joka on peräisin joko nousun tai louhosleikkauksien palamattomilla rei'illä.

Edellisten perusteella voidaan vahvistaa liutusanalyysissä saadut tulokset palamattomien räjähdysaineiden osuuksien ja louheiden typpipitoisuuksien osalta että TRB-nousuja hyödyntämällä saavutetaan alhaisemmat typpipäästöt kuin PRN-menetelmällä.

PRN-louhoksien latvaräjäytyksien välillä palamattomien räjähteiden osuuksien voi havaita laskeneen panostussukkaa hyödyntämällä vain latvaräjäytyksen louheen typpipitoisuutta arvioiden. Tulokset ovat kuitenkin vaihtelevia ja raportoinnissa sekä tärinämittauksilla saaduilla tiedoilla ei voida poissulkea menetelmien epäonnistumista.

Virhelähteiden mahdollisuutta kasvattaa myös 375L162_1 louhoksen molemmista räjäytyksistä lastattujen näytekasojen poikkeavan suuret lohkat, mitkä vähensivät näytteiden murskattavaa materiaalmäärää tuloksiin sitä kautta vaikuttaen.

Vaikka louhoksen 325L165_1 kapeammasta mallista johtuen käytetyt leikkausvälit olivat pienemmät ja louhoksesta olisi ollut odotettavaa että suuremmalla suunnitellulla ominaispanostusasteella saataisiin korkeammat typpipäästöt. Todellinen ominaispanostusaste tässä louhoksessa oli kuitenkin suunniteltua pienempi kapean leikkausvälien ja nousun aiheuttaessa ryöstöä latvaräjäytyksellä ensimmäisen leikkauksen porarei'illä, minkä seurauksena leikkauksella 1 panostaja oli jättänyt 2 porareikää panostamatta ja panostusmäärien raportointi oli puutteellista. Kyseiseltä leikkaukselta oli myös raportoitu reikien vuotavan ja molemmissa räjäytyksissä yhdet porareiät olivat panostettu emulsion sijasta määrämittaan asti patruunoilla. Tämä vähentää 325L165_1 louhoksen mahdollista räjähdysaineiden vuotamista rakoihin, mikä vaikuttaa tuloksissa poikkeamia poistavana tekijänä.

Liutusanalyysin tuloksien perusteella lasketun testilouhoksien typpipitoisuuden keskiarvoa hyödyntämällä laskettiin taulukon 22 mukaiset karkeat arviot kaivoksen malmituotannosta aiheutuviksi typpipäästöiksi. Taulukon luvut eivät huomioi louhinnan jakautumista tuotannon ja peränajon välille, vaan perustuvat näytteiden kiintoaineksien sisältämiin typen määriin, joten lukuja voidaan pitää vain karkeina suuntaa antavina arvioina.

Taulukko 22. Liutustuloksien perusteella arvioidut vuosittaiset louhinnan aiheuttamat typpipäästöt

	2016 [t]	2017 [t]
Kaivoksen malmituotanto	1 600 000	1 500 000
Louhinnasta aiheutuvat typpipäästöt	61	57

6.2 Menetelmien virhelähteiden arviointi

Tutkittavien näytteiden kerääminen oli tehtävä niin, että otanta on mahdollisimman perustavanlaatuinen ja näytteet ovat jäljitettävissä yksittäisiin louhosräjäytyksiin. Tämän lisäksi näytteenoton oli vastattava tutkimukselle annettuja aikamääreitä.

Tutkimusta varten käytiin läpi eri näytteenottomenetelmiä ja -vaiheita rikastuslaitoksen ja louhoslastauksen välillä. Otannan kannalta perustavanlaatuisin näytteenotto todettiin saavutettavan keräämällä säännöllisiä louhenäytteitä koko louhoslastauksen ajan, jolloin näytteet edustaisivat koko louhosräjäytystä. Tämän kaltainen näytteenotto laajemmalla raekoon jakaumalla ei kuitenkaan ollut mahdollista lastaustasojen tilan puutteen ja lastauksen aikataulun vuoksi, joten näytteenotto täytyi suorittaa epäjatkuvana.

Suoraan louhoksista kerättävä näytteenotto vaikutti helpoimmalta järjestää ottamalla kokonaisista malmikuormia tutkimukseen. Kaivoksella käytössä olevien kiviautojen kuljetuskapasiteetti on n. 30 t, mikä täyttyy kahdella Sandvik Toro 517LH – lastauskoneen kauhallisella. Otannan luotettavuuden parantamiseksi louhoksista päätettiin kerätä 2 kiviautollista kuormaa lastauksen eri vaiheissa.

Lastausvaiheiden näytteet arvioitiin erillisinä, jotta saataisiin tietoa mahdollisesta tuloksien keskinäisestä poikkeavuudesta. Näytteenoton kokonaisotanta louheesta jäi kuitenkin pieneksi suhteessa louhittuihin tonneihin., jolloin tarkkuuden parantamiseksi eri lastausvaiheiden kuormia olisi kannattavaa jatkotutkimuksien osalta ottaa tiheämmin.

Vaihtoehtoisena näytteenottomenetelmänä tutkittiin myös näytteiden ottamista rikastuslaitoksen murskauksen jälkeiseltä hihnalta, jotta louheen kappalekoko olisi jo valmiiksi analysointiin sopivaa. Näytteiden jäljitettävyyys olisi kuitenkin osoittautunut haasteelliseksi näytteenottopaikkaa edeltävän siilon, n. 10 tunnin viiveen vuoksi. Tuloksien luotettavuus olisi ollut riittämättömällä tasolla huomioiden rikastamon syötteen koostuminen monesta eri aumasta. Luotettavampien tuloksien vuoksi näytteenotto suoraan louhoksista vaikutti kuitenkin järkevämältä.

Vertailevat louhinnasta aiheutuvia typpipäästöjä koskevat tutkimus (Rahko 2015), missä näytteenotto suoritettiin suoraan raakalouhetta lastaamalla, osoitti louheen tarvitsemaksi liuotusajaksi n. 3 kk. Tämä olisi ollut liian pitkä aika tutkimuksen aikataulutusta ajatellen. Tästä johtuen louheen raekokoa pienentämällä pyrittiin mobiilimurskauksella nopeuttamaan liuotusanalyysien tarvitsemaa liuotusaikaa.

Louhetta murskaimeen syötettäessä huomattiin että louhekasoissa oli isoja lohkarkeit, joiden murskaamiseksi olisi tarvittu esirikotusta. Tästä johtuen huomattava määrä louhetta jäi pois laboratorioon lähetettävistä näytteistä. Raekoon valikoitumisen vaikutuksien estämiseksi suuret lohkareet olisi suositeltavaa rikkoa, jotta voidaan poissulkea siitä johtuvat virhelähteet tuloksissa.



Kuvat 38 ja 39. Laboratorion leukamurskain sekä murskattavan näytteen jääminen tärysyttimelle.

Näytteet oli tarkoitus murskata kaivoksen laboratoriossa käytössä olevalla leukamurskaimella 0-2 mm raekokoon (Kuva 38). Ensimmäistä näytettä murskattaessa ilmeni että kosteaa mursketta jauhaessa hyvin suuri osuus näytteestä jäi kiinni tärysyttimelle ja murskaimen sisäpinnoille (Kuva 39). Tämän välttämiseksi murskaimella yleisesti murskattavat näytteet kuivatetaan uunissa. Tätä ei kuitenkaan voitu typen haihtumisen välttämiseksi tehdä, joten laboratorioon lähetettävät sankonäytteet täytyi muodostaa suoraan mobiilimurskatusta murskeesta.

Lähetettävä näytekoko asetti rajoitteita näytteen sisältämien kappaleiden koolle ja tämän voi osaltaan nähdä tuloksiin vaikuttavana tekijänä, koska analysoitavan typen voi odottaa sijaitsevan vain räjäytyksessä muodostuneiden louhekappaleiden pinnoilla eikä näiden sisällä. Tästä johtuen näytteiden murskauksesta ja näytekoon pienentämisestä johtuvan raekoon valikoitumisen vuoksi, todellisten reagoimattomien räjähteiden määrän voi odottaa olevan nyt saatuja tuloksia alhaisempi.

Murskatusta murskeesta voisi myös odottaa olevan kannattavampaa suorittaa pidempikestoisia konttiliuotuksia, jotta näytteen raekoon valikoitumisen virhelähteet saadaan poistettua.

7 Johtopäätökset

Tutkimuksessa saatujen tuloksien ja niiden käsittelyn mukaisesti TRB-nousua hyödyntämällä voidaan louhinnasta aiheutuvien typpipäästöjen odottaa olevan alhaisemmat kuin tavanomaisia pitkäreikänoussuja ja niiden räjäytysvaiheita hyödyntämällä. Latvaräjäytyksissä TRB-nousulla saavutettiin tutkimusten mukaan 11–15 % vähemmän reagoimattomia räjähdysaineita ja n. 37–40 % alhaisempi louheen typpipitoisuus kuin PRN-louhoksissa. Alhaisempien typpipäästöjen lisäksi TRB-nousun porakaavio sisältää vähemmän pitkäreikäkoneella porattavia metrejä sekä vähemmän räjäytysvaiheita nousun varmemman louhittavuuden vuoksi.

TRB-nousun rajoittavat tekijät ovat Kittilän kaivoksella olleet sekä yläkätinen porausmenetelmä että kallistuksien rajoitteet, minkä vuoksi se ei ole soveltunut käytettäväksi kaikissa louhoksissa. Tästä johtuen poraus- ja panostussuunnittelua kehittävänä toimenpiteenä olisi hyödyntää tuotantolouhinnassa edellisen lisäksi myös alakätisesti kiertoporaavaa nousuporaa, mikä kykenisi myös poraamaan sivukallistettuja nousun avausreikiä.

Panostussukan käytöstä saatujen tuloksien keskinäisen hajonnan vuoksi riski virhelähteen vaikutukseen on suuri eikä panostussukan hyödyntämisen vaikutuksia voi tässä tapauksessa varmuudella yhdistää louhinnasta aiheutuviin typpipäästöihin. Panostussukka kuitenkin estää tehokkaasti räjähdysaineen vuotamisen porareistä reiän ympärillä oleviin rakoihin ja porareikää pienemmän panostussukan avulla on mahdollista keventää reiän ominaispanostusta, jolloin sen voi nähdä panostusta hyödyttävänä sekä mahdollisesti typpipäästöjä vähentävänä apuvälineenä. Sen käyttäminen on siis kannattavaa epäiltäessä heikkoa ja rakoilevaa kiveä. Tällaisesta voi antaa viitteitä, jos esimerkiksi huuhteluvesi on reikää porattaessa kadonnut kokonaan..

Panostussukan sijaan tuloksien perusteella reagoimattomien räjähdysaineiden osuudet vaikuttavat louhosmittakaavassa olevan jossain määrin verrannollisia toteutuneisiin ominaispanostusasteisiin, mikä viittaisi siihen että räjähdysainemäärien maltillisella pienentämisellä saavutettaisiin myös pienemmät louhinnasta aiheutuvat typpipäästöt.

Poraus- ja panostussuunnittelun vaikutusmenetelmien lisäselvittämiseksi typpipäästöjen kannalta voi nähdä järkevänä suorittaa lisätutkimuksia suoraan louhoksista suoritettavalla näytteenotolla. Näin analysoitava materiaali on mahdollisimman häiriintymätöntä ja

louhe on mahdollista arvioida lastausvaiheittain, jolloin räjäytyksen sisäisiä eroavaisuuksia on mahdollista havaita. Tässä tapauksessa otannan on oltava tarpeeksi laaja tuloksien perustavanlaatuisuuden varmistamiseksi.

Menetelmien toteamiseksi reikäsuoritusmittaukset osoittautuivat tuloksia ja niiden syitä tukevaksi mittausmenetelmäksi, joita olisi suositeltavaa suorittaa porauksen toteumaa varmistaessa ja tuloksien mahdollisia virhelähteitä poistettaessa.

Tutkimuksessa havaittiin myös että tärinämittauksella on mahdollista arvioida louhinnan sisäisiä ongelmakohtia. Vaikka tärinämittauksella saatu informaatio yksistään ei kerro reagoiko panostettu räjähdysaine, on sen perusteella mahdollista tehdä havaintoja räjäytyksen etenemisen poikkeamista. Tärinöiden eroteltavuuden vuoksi olisi suositeltavaa että mittauspisteet määriteltäisiin aina louhittavan louhosalueen mukaan, jotta mitattava tärinä on mahdollisimman häiriintymätöntä ja heijastumatonta.

Todellisen louheen sisältämän typen tutkimiseksi ja pidemmän ajan pitoisuuksien vaihtelun selvittämiseksi, typpianalyysijä olisi yksittäisten louhoksen sijaan kannattavaa suorittaa rikastamon syötteestä tasaisin väliajoin kerättävin murskenäyttein. Näin tuloksista voidaan koostaa suuremman kokonaiskuvan analyysijä sekä vertailla louhintajärjestyksen mukaista vaihtelua ja niiden eroavaisuuksien merkitystä typpipäästöihin.

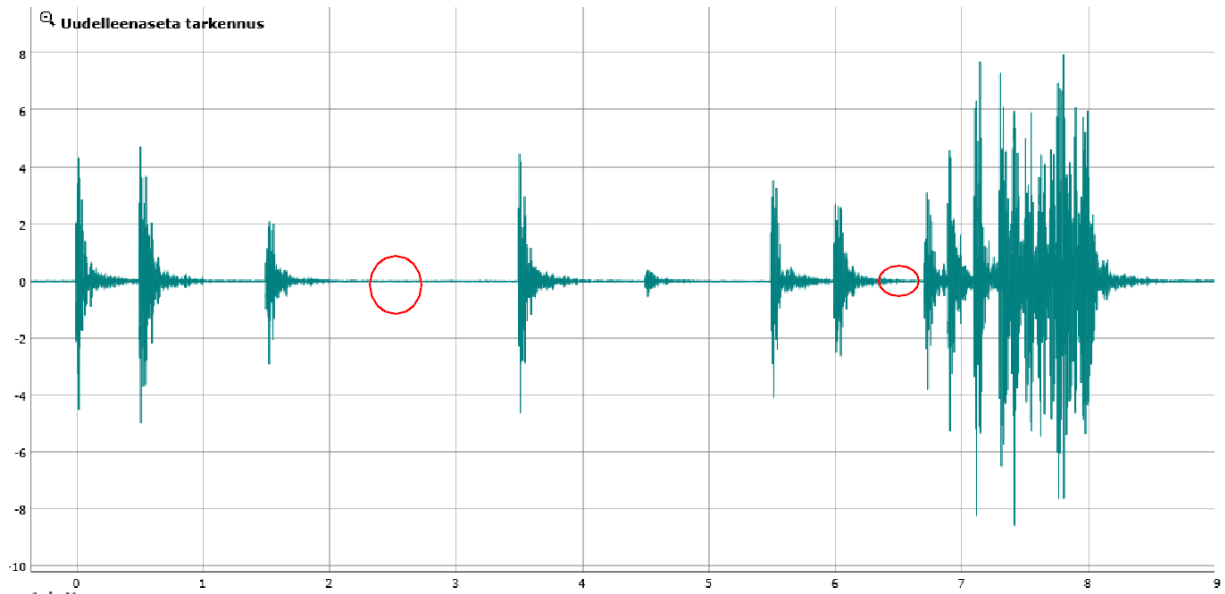
8 Lähdeluettelo

- Agnico Eagle Finland Oy. 2017. ”Kittilä Mine General Presentation.” Kiistala: Agnico Eagle Finland Oy.
- Agnico Eagle Finland Oy. 2014. *Louhossuunnittelu muistio*. Kittilä: Agnico Eagle Finland Oy.
- Agnico Eagle Mines Ltd. 2016. *AGNICO EAGLE MINES LIMITED DETAILED MINERAL RESERVES AND RESOURCES DATA*. Toronto: Agnico Eagle Mines Ltd.
- . 2017. *Operations and development projects*. Agnico Eagle Mines Ltd. <https://www.agnicoeagle.com/English/operations-and-development-projects/operations/kittila/default.aspx>.
- Black Box Network Services. 2017. *Black Box on mukana kaivamassa kultaa Kittilässä*. Black Box Network Services. <https://www.blackbox.fi/fi-fi/page/21438/Resurssit/Dokumentit-kirjallisuus/Tapaustutkimukset/kittiln-kultakaivos>.
- Doucet, D., D. Girard, L. Grondin, ja P. Matte. 2010. *Technical Report on the December 31, 2009, Mineral Resource and Mineral Reserve*. Toronto: Agnico-Eagle Mines Limited.
- Forcit Oy Ab. 2014. ”Kemiitti 810 Esite.” *Ruutiset*.
- Forcit Oy Ab. 2015. *Käyttöturvallisuustiedote Kemiitti 810 matriisi*. Hanko: Forcit Oy Ab.
- Forsberg, H., ja H. Åkerlund. 1999. *Kväve och spränämnesrester i LKAB:s malm-, gråbergs- och produktflöden*. Master's Thesis, Luleå: Luleå Tekniska Universitet.
- Forsyth, B., A. Cameron, ja S. Miller. 1995. ”Explosives and Water Quality.” *Sudbury '95*. Ontario. 795-803.
- Hamidzadeh, H.R. 2014. ”Chapter 10: Three-Dimensional Wave Propagations in Porous Half-Space Subjected to Multiple Energy Excitations.” Teoksessa *Wave Propagation in Solid and Porous Half-Space Media*, 187-191. New York: Springer Science.
- Hjerpe, J. 2011. *Kartläggning av kväve i vatten i LKAB:s verksamhet i Malmberget år 2011 och kvävet's betydelse i akvatiska ekosystem ur ett lokalt och ett globalt perspektiv*. Seminarieuppsatser, Lund: Lunds Universitet.
- Hänninen, Tuomo. 2011. *Elektronisten nallien käytön vaikutukset Pyhäsalmen kaivoksen tuotantolouhintaan*. Master's Thesis, Espoo: Aalto yliopisto.

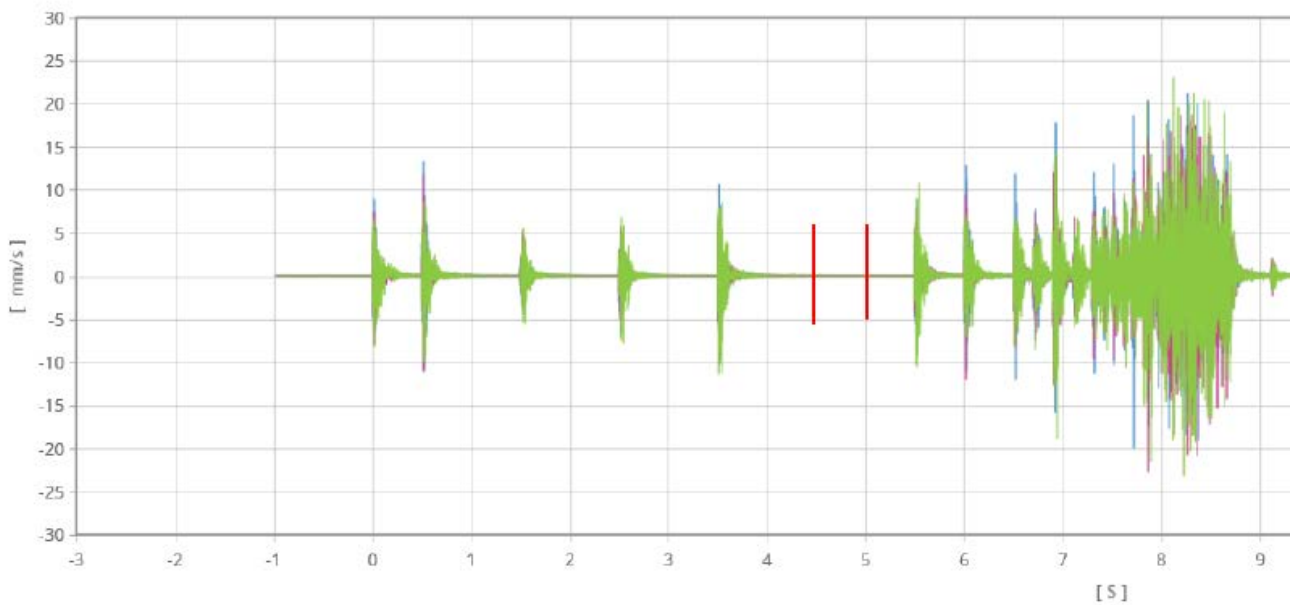
- Jermakka, J., L. Wendling, E. Sohlberg, H. Heinonen, E. Merta, J. Laine-Ylijoki, T. Kaartinen, ja U-M. Mroueh. 2015. *Nitrogen compounds at mines and quarries*. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland Ltd.
- Kauppila, T., P.M Kauppila, M.L. Räisänen, H. Makkonen, J. Jantunen, H. Komulainen, H., Kauppinen, T. Törmä, ym. 2015. *Hyviä käytäntöjä kaivoshankkeiden ympäristövaikutusten arvioinnissa*. Espoo: Geologian tutkimuskeskus GTK.
- Lindeström, Lennart. 2012. *Kväveutsläpp från Gruvindustrin*. Stockholm: SveMin.
- Mahadevan, E. G.,. 2013. *Ammonium Nitrate Explosives for Civil applications*. Weinheim : Wiley-VCH-Verl.
- Oy Forcit Ab. 2015. *Käyttöturvallisuustiedote K810 U*. Hanko: Forcit Oy Ab.
- Oy Forcit Ab/ Pentti Vihanto. 2007. ”Emulsiopanostus - Mullistavaa menetelmäkehitystä räjäytystyössä.” Vuorimiespäivät 2007/ Helsinki: Vuorimiesyhdistys ry.
- Paalumäki, T., P. Lappalainen, ja A. Hakapää. 2015. *Kaivos- ja louhintatekniikka*. Helsinki: Kaivosteollisuus ry ja Opetushallitus.
- Rahko, J. 2015. *Nitrogen Residues from Bulk Emulsion Explosives in Blasted Rock*. Master's Thesis, Espoo: Aalto yliopisto.
- Revey, G.F. 1996. ”Practical methods to control explosives losses and reduce ammonia and nitrate levels in mine water.” *Mining Engineering* 61-64.
- Räjähdeyhdistys, Suomen Kemian Seura. 2005. *Räjähdekirja*. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
- Sjölund, Gustaf. 1997. *Kväveläckage från sprängstensmassor*. Examensarbete, Lidingö: Luleå Tekniska Universitet.
- Stiehr, J.F. 2011. *ISEE Blaster's Handbook*. Cleveland: International Society of Explosive.
- Tchobanoglous, G., F.L. Burton, ja D.H. Stensel. 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Boston: McGraw-Hill Education.
- Watson, C.G. 1991. *Ammonium nitrate leaching from explosives, Internal ICI Explosives Report*. Quebec: Explosives Technical Center.
- Wu, Y.K., Hao H., Zhou Y.X., ja Chong K. 1998. *Propagation characteristics of blast-induced shock waves in a jointed rock mass*. Research, Singapore: Nanyang Technological University.
- Vuolio, R., ja T. Halonen. 2012. *Räjäytystyöt*. Helsinki: Suomen Rakennusmedia Oy.

9 Liitteet

Liite 1(1/3). 450L173_1 Tärinämittaukset

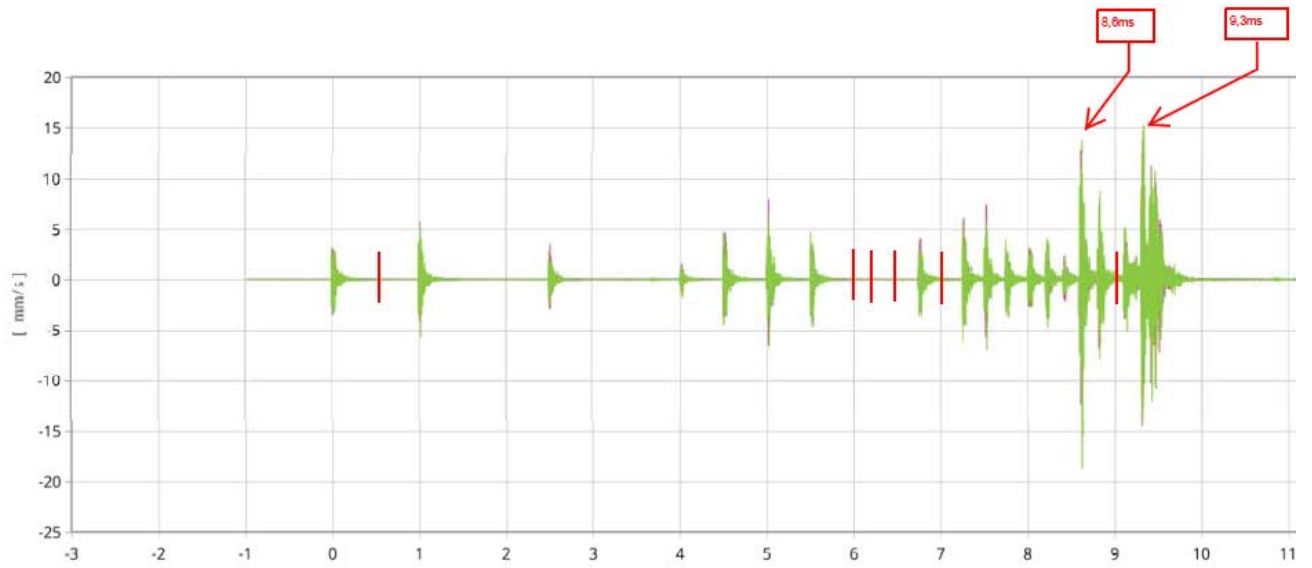


450L173_1 louhoksen latvaräjäytyksen tärinädata ja merkatut poikkeamat



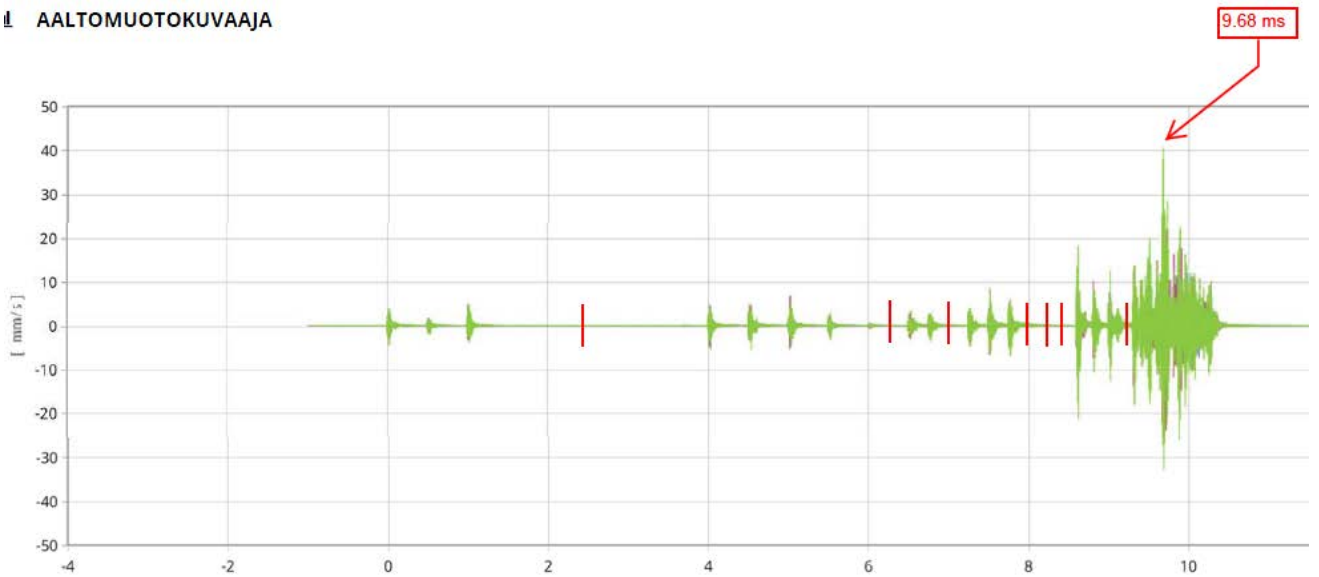
450L173_1 louhoksen loppuräjäytyksen tärinädata ja merkatut poikkeamat

Liite 1(2/3). 325L165_1 Tärinämittaukset



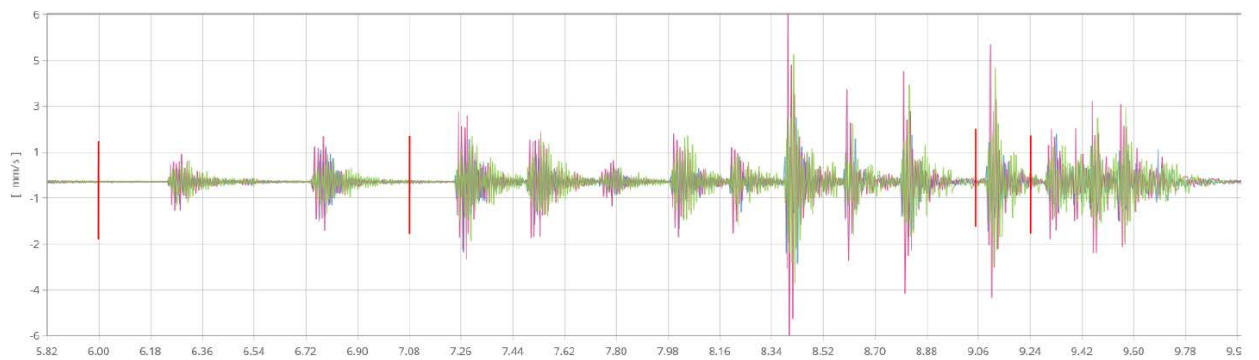
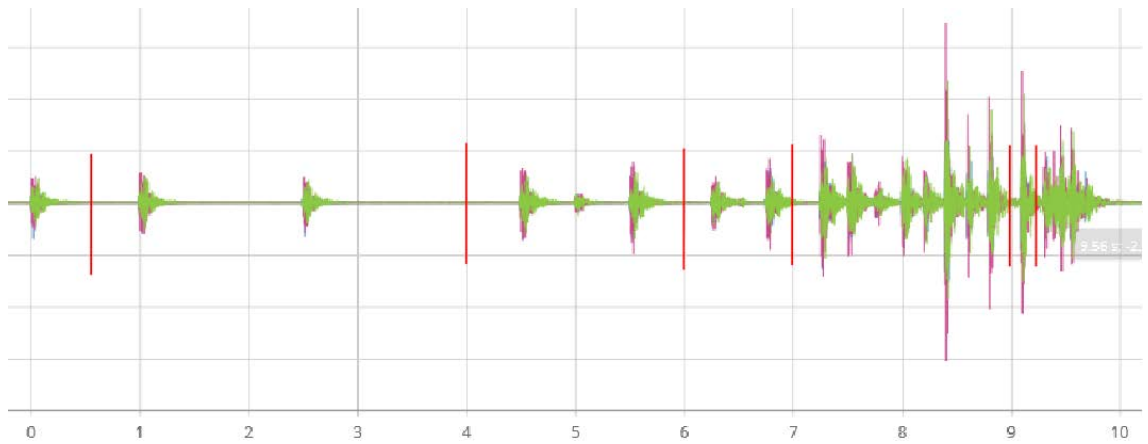
325L165_1 louhoksen latvaräjäytyksen tärinädata ja merkatut poikkeamat.

┆ AALTOUOTOKUVAAJA

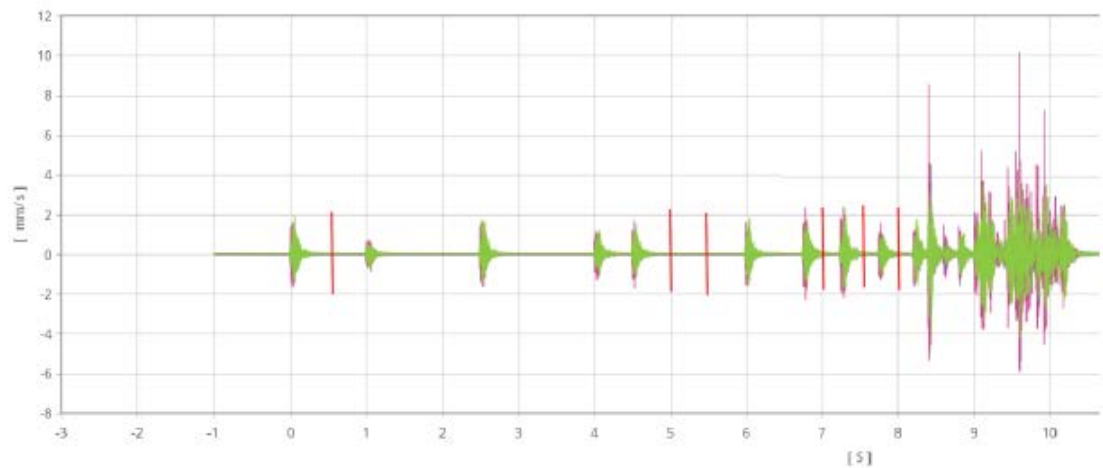


325L165_1 louhoksen loppuräjäytyksen tärinädata ja merkatut poikkeamat

Liite 1(3/3). 375L162_1 Tärinämittaukset



375L162_1 louhoksen latvaräjäytyksen tärinädata ja merkatut poikkeamat



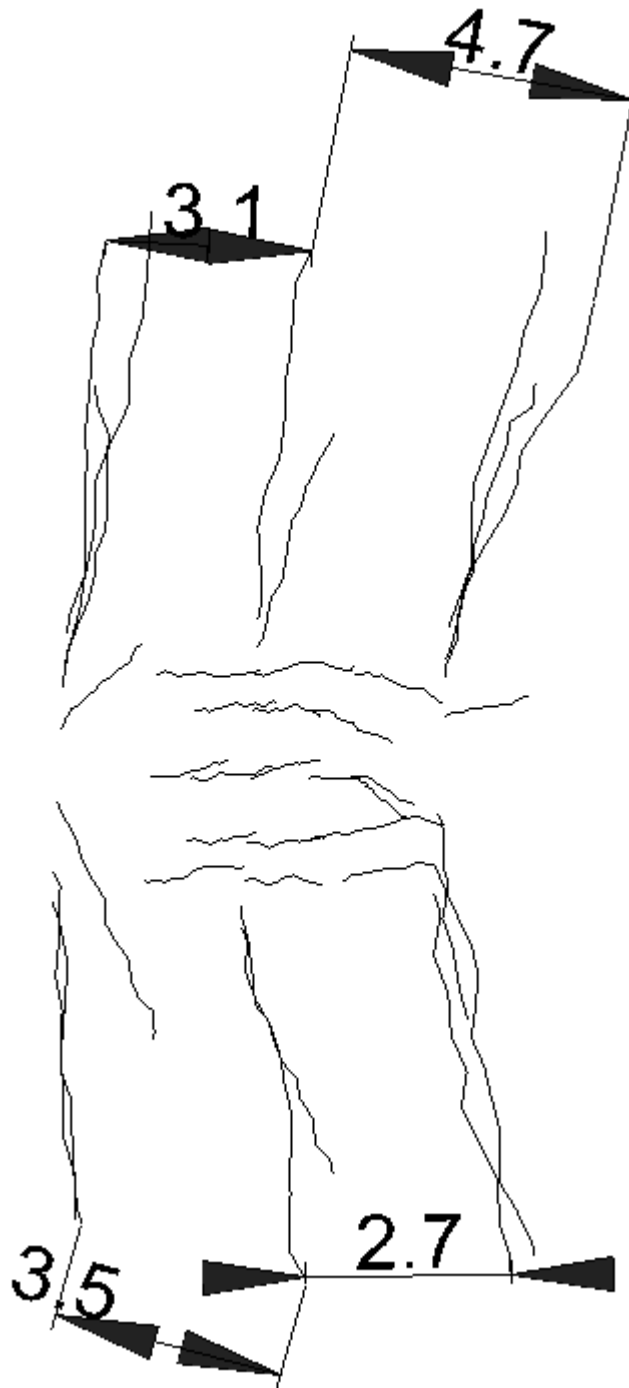
375L162_1 louhoksen loppuräjäytyksen tärinädata ja merkatut poikkeamat

Liite 2(1/3). Reikäsuoruuksmittaukset 325L165_1



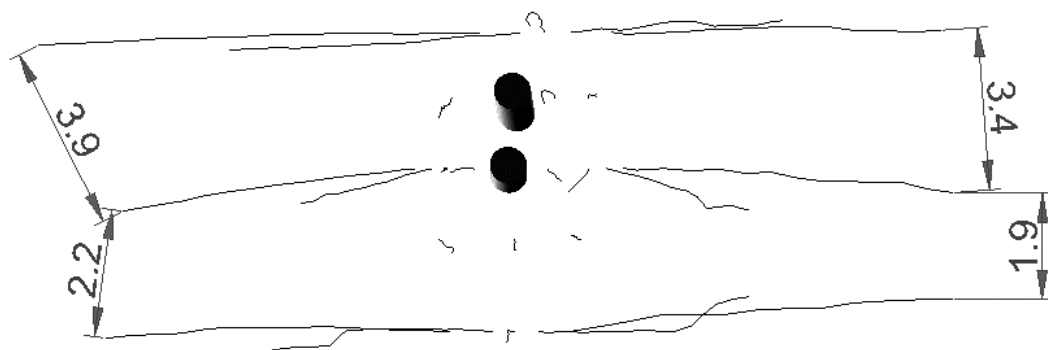
325L165_1 Reikäsuoruuksmittauksissa todetut kulmareikien etäisyydet.

Liite 2(2/3). Reikäsuoruuksmittaukset 375L162_1

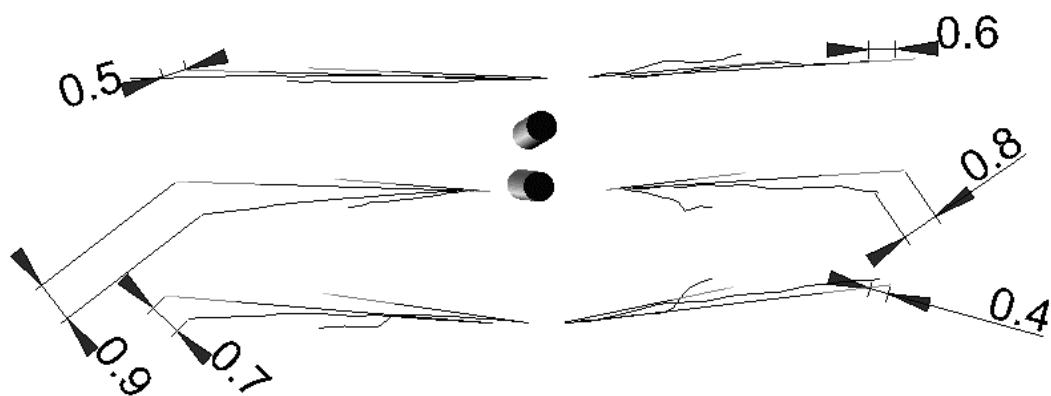


Reikäsuoruuksmittauksissa todetut kulmareikien etäisyydet.

Liite 2(3/3). Reikäsuoruuksmittaukset: 450L173_1

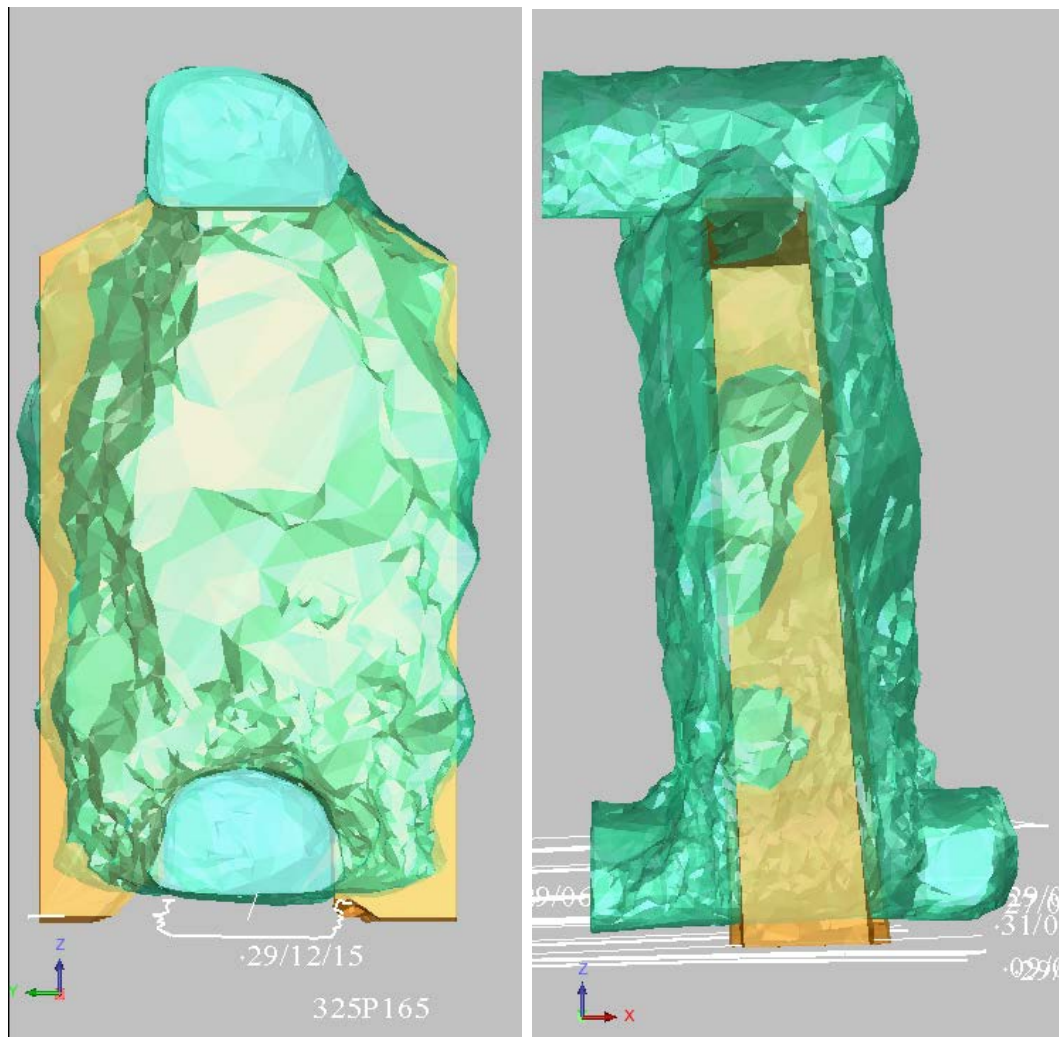


Reikäsuoruuksmittauksissa todetut kulmareikien etäisyydet



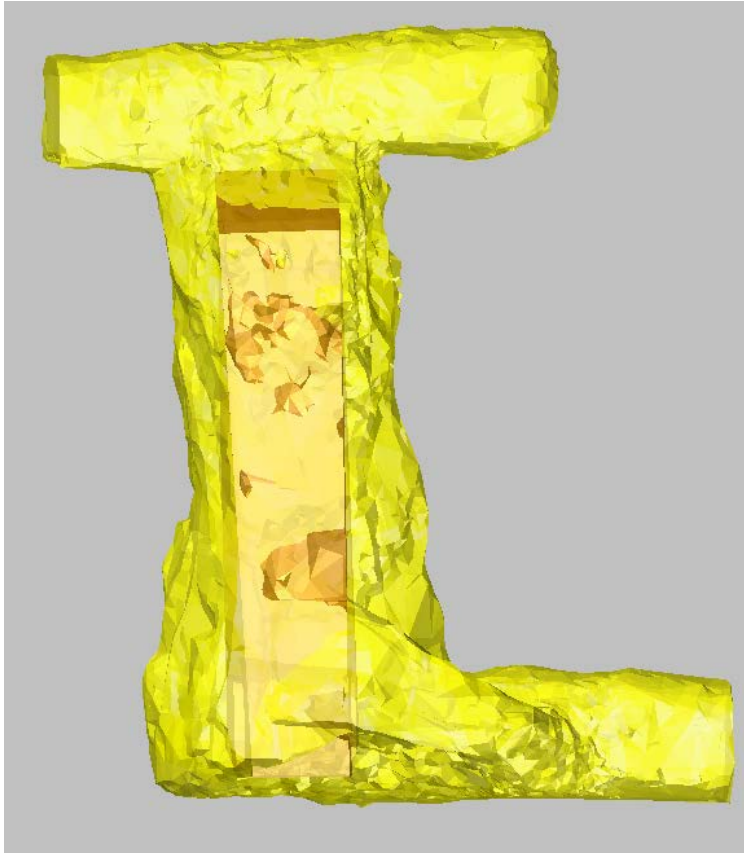
Reikäsuoruuksmittauksissa saadut kulmareikien poikkeamat.

Liite 3(1/3). Laserskannaukset 325L165_1



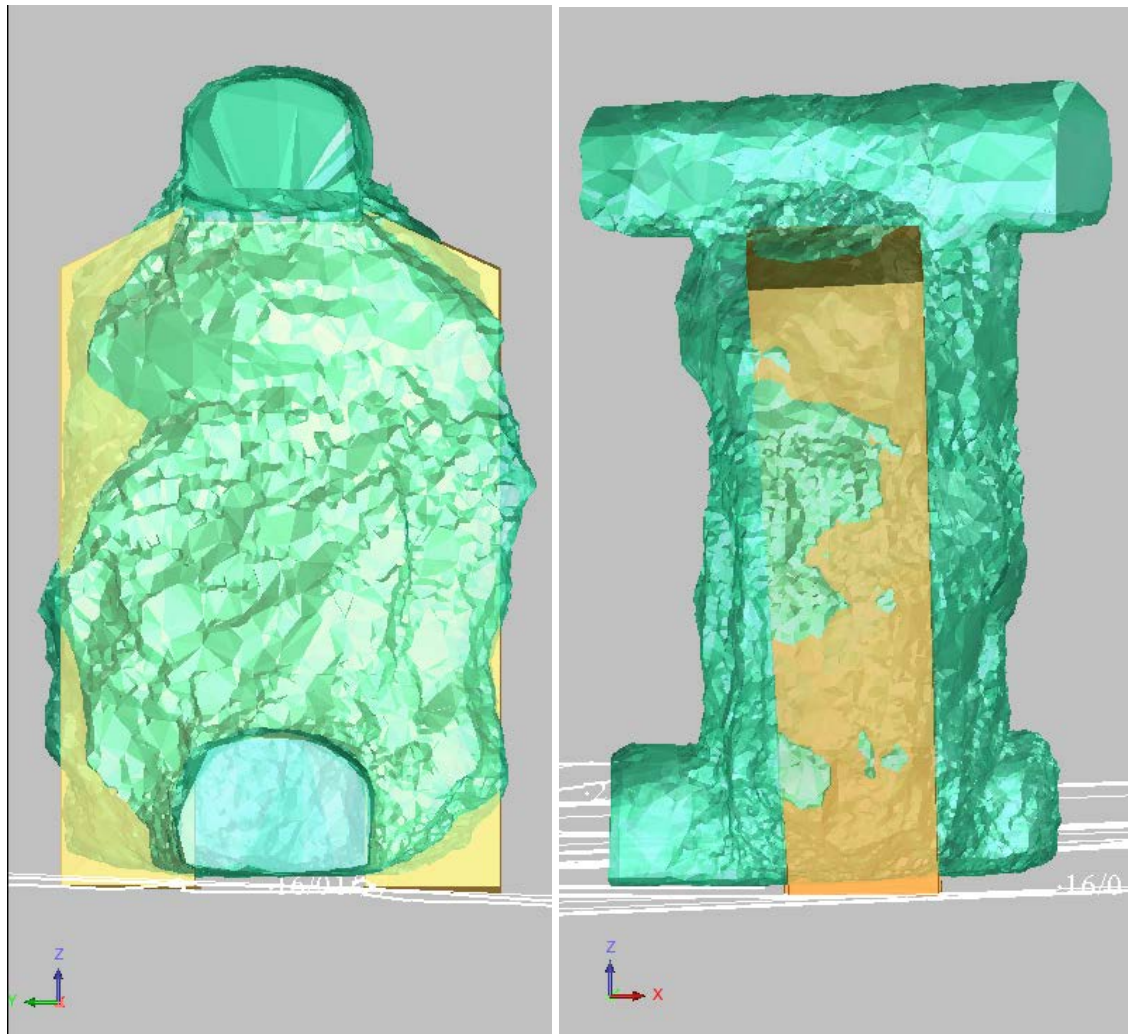
325L165_1 –louhoksen laserskannausmalli kuvattuna etelästä pohjoiseen

Liite 3(2/3). Laserskannaukset 375L162_1



375L162_1 -louhoksen laserskannausmalli kuvattuna etelästä pohjoiseen

Liite 3(3/3). Laserskannaukset 450L173_1



450L173_1 –louhoksen laserskannausmalli kuvattuna etelästä pohjoiseen

Liite 4(1/3). Liuotusanalyysit: Kokonaistyyppi

450L173_1 = TRB-louhos			
325L165_1 = PRN ilman sukkaa		Typpi (N), kokonais-	Typpi (N), kokonais-
375L162_1 = PRN panos-tussukalla		RA2085	RA2021
	Otopaikka	mg/l	mg/l
450L173_1_R1L1	Näyte 1, päivä 1		33
	Näyte 1, päivä 2		4
	Näyte 1, päivä 3	1,6	
	Näyte 1, päivä 4	1,1	
	Näyte 1, päivä 7	1,2	
450L173_1_R1L2	Näyte 2, päivä 1		10
	Näyte 2, päivä 2		2,4
325L165_1_R1L1	Näyte 3, päivä 1		45
	Näyte 3, päivä 2		6,9
325L165_1_R1L2	Näyte 4, päivä 1		28
	Näyte 4, päivä 2		4,6
450L173_1_R2L1	Näyte5,päivä 1		15
	Näyte 5, päivä 2		2,5
450L173_1_R2L2	Näyte6, päivä 1		14
	Näyte 6, päivä 2		2
325L165_1_R2L1	Näyte 7,päivä 1		12
	Näyte 7, päivä 2		2
325L165_1_R2L2	Näyte 8, päivä 1		6,1
	Näyte 8, päivä 2	1,5	
375L162_1_R1L1	Näyte 9, päivä 1		16
	Näyte 9, päivä 2	2,5	
375L162_1_R1L2	Näyte 10, päivä 1		55
	Näyte 10, päivä 2	7,2	
375L162_1_R2L1	Näyte 11, päivä 1		14
	Näyte 11, päivä 2	2,5	
375L162_1_R2L2	Näyte 12, päivä 1		12
	Näyte 12, päivä 2	2,1	
	0-näyte, päivä 1		2,2
	0-näyte, päivä 2	0,51	
	Ref. näyte,päivä 1		780
	Ref. näyte, päivä 2		62

Liite 4 (2/3). Liuotusanalyysit: Nitraatti- ja nitriittityppi

450L173_1 = TRB-louhos			
325L165_1 = PRN ilman sukkaa		Nitraattityppi (NO ₃ -N)	Nitriittityppi (NO ₂ -N)
375L162_1 = PRN panostussukalla		RA2018	RA2035
	Ottopaikka	mg/l	mg/l
450L173_1_R1L1	Näyte 1, päivä 1	9,8	0,015
	Näyte 1, päivä 2	0,9	<0,010
	Näyte 1, päivä 3	<0,25	0,0029
	Näyte 1, päivä 4	<0,25	<0,0020
	Näyte 1, päivä 7	<0,25	<0,0040
450L173_1_R1L2	Näyte 2, päivä 1	5,2	0,0028
	Näyte 2, päivä 2	0,4	<0,0020
325L165_1_R1L1	Näyte 3, päivä 1	25	0,0056
	Näyte 3, päivä 2	2	<0,0020
325L165_1_R1L2	Näyte 4, päivä 1	16	0,0034
	Näyte 4, päivä 2	1,5	<0,0020
450L173_1_R2L1	Näyte 5, päivä 1	8,2	0,0074
	Näyte 5, päivä 2	0,52	<0,0020
450L173_1_R2L2	Näyte 6, päivä 1	8,5	0,0036
	Näyte 6, päivä 2	0,38	<0,0020
325L165_1_R2L1	Näyte 7, päivä 1	6,5	<0,0020
	Näyte 7, päivä 2	0,5	<0,0020
325L165_1_R2L2	Näyte 8, päivä 1	2,8	<0,0020
	Näyte 8, päivä 2	0,34	<0,0020
375L162_1_R1L1	Näyte 9, päivä 1	7,9	<0,010
	Näyte 9, päivä 2	0,76	<0,010
375L162_1_R1L2	Näyte 10, päivä 1	31	<0,010
	Näyte 10, päivä 2	2,4	<0,010
375L162_1_R2L1	Näyte 11, päivä 1	6,9	<0,010
	Näyte 11, päivä 2	0,63	<0,010
375L162_1_R2L2	Näyte 12, päivä 1	6,1	<0,010
	Näyte 12, päivä 2	0,51	<0,010
	Nolla näyte, päivä 1	0,74	<0,010
	Nolla näyte, päivä 2	<0,25	<0,010
	Ref. näyte, päivä 1	410	0,021
	Ref. näyte, päivä 2	26	<0,010

Liite 4 (3/3). Liuotusanalyysit: Ammoniumtyppi

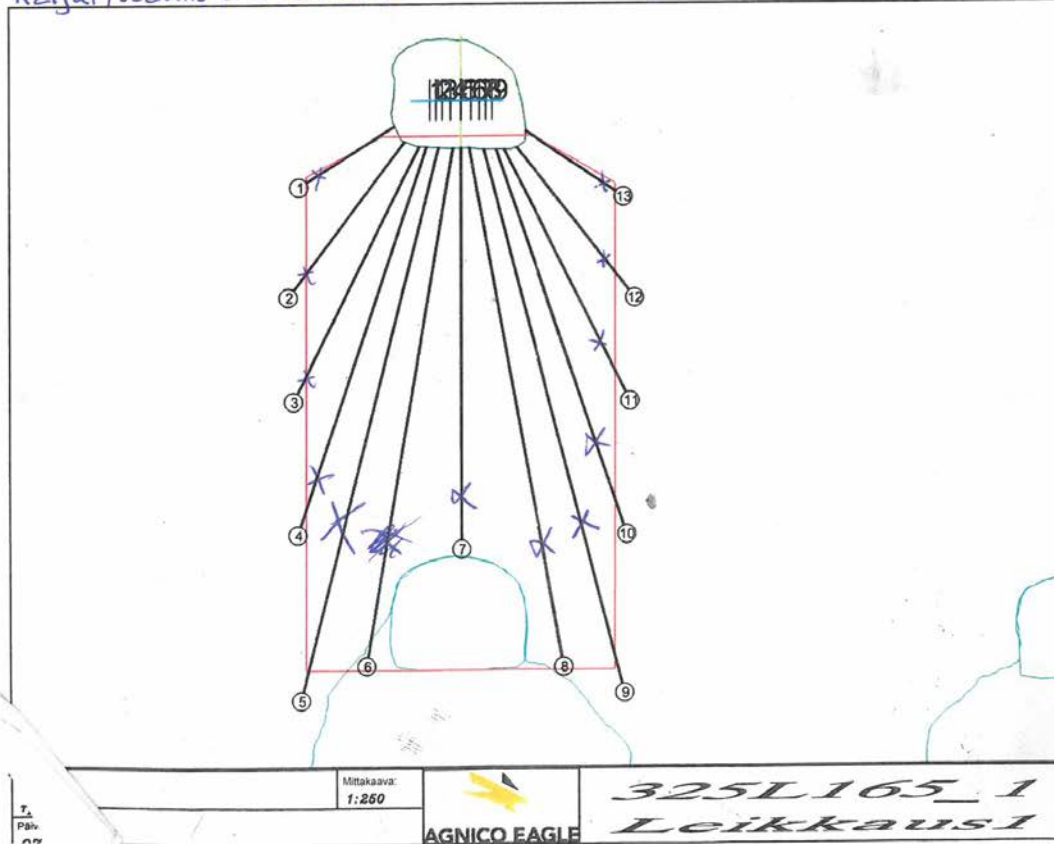
450L173_1 = TRB-louhos			
325L165_1 = PRN ilman sukkaa		Ammonium-typpi (NH ₄ -N)	Ammonium-typpi (NH ₄ -N)
375L162_1 = PRN pannonstussukalla		RA2046	RA2034
	Otopaikka	mg/l	mg/l
450L173_1_R1L1	Näyte 1, päivä 1		13
	Näyte 1, päivä 2	0,25	
	Näyte 1, päivä 3	0,098	
	Näyte 1, päivä 4	0,16	
	Näyte 1, päivä 7	<0,0040	
450L173_1_R1L2	Näyte 2, päivä 1		4,7
	Näyte 2, päivä 2	0,2	
325L165_1_R1L1	Näyte 3, päivä 1		20
	Näyte 3, päivä 2	0,85	
325L165_1_R1L2	Näyte 4, päivä 1		13
	Näyte 4, päivä 2	0,48	
450L173_1_R2L1	Näyte 5, päivä 1		6,6
	Näyte 5, päivä 2	0,92	
450L173_1_R2L2	Näyte 6, päivä 1		5,3
	Näyte 6, päivä 2	0,18	
325L165_1_R2L1	Näyte 7, päivä 1		5
	Näyte 7, päivä 2	0,38	
325L165_1_R2L2	Näyte 8, päivä 1		2,7
	Näyte 8, päivä 2	0,26	
375L162_1_R1L1	Näyte 9, päivä 1		8,8
	Näyte 9, päivä 2	0,72	
375L162_1_R1L2	Näyte 10, päivä 1		25
	Näyte 10, päivä 2	0,99	
375L162_1_R2L1	Näyte 11, päivä 1		6,6
	Näyte 11, päivä 2	1,1	
375L162_1_R2L2	Näyte 12, päivä 1		6,2
	Näyte 12, päivä 2	1,7	
	0-näyte, päivä 1		1,7
	0-näyte, päivä 2	0,39	
	Ref. näyte, päivä 1		380
	Ref. näyte, päivä 2		37

Liite 5. Esimerkki poraraportti

	Etukalt	Sivu	Kalt	Pituus	Läpi?	Porattu	Pvm	Kommentit
1	Etu5	V1.2	V-58.0	5.1		5.10	21.12	
2	Etu5	V1.2	V-37.2	9.0		3.00	21.12	
3	Etu5	V0.9	V-26.5	13.4		13.40	21.12	
4	Etu5	V0.9	V-18.6	19.4		19.4	22.12	
5	Etu5	V0.5	V-14.1	27.2		27.2	22.12	Tukko 17m
6	Etu5	V0.0	V-9.6	25.0	X	21.07	22.12	
7	Etu5	V0.0	O0.0	19.0	X	17.50	22.12	
8	Etu5	V0.0	O10.2	25.1	X	21.74	22.12	
9	Etu5	O0.5	O14.4	26.8		26.8	22.12	
10	Etu5	O0.9	O18.7	19.3		19.3	22.12	
11	Etu5	O0.9	O26.6	13.2		13.2	22.12	Tukko 8m
12	Etu5	O0.9	O38.1	8.8		8.80	21.12	
13	Etu5	O0.9	O56.0	5.3		5.30	21.12	
				216.6				

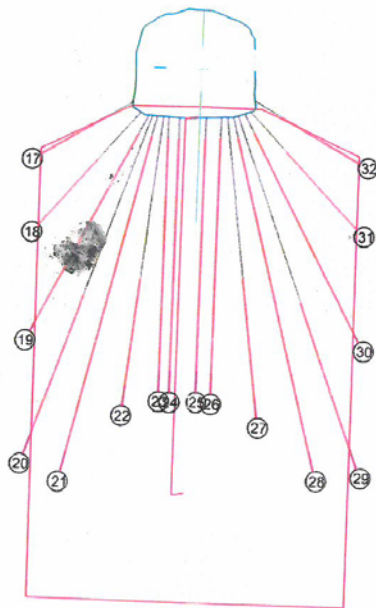
Vesiriski 20m

Reijät luodattu OK, 22.12.16



Liite 6. Esimerkki panostusraportti

ID	Pituus	Kansi	Panospituus	Emulsio (kg)	R-aine	Todelliset kg	Kommentit
17	5,0	1,3	3,7	25,4	K810	21	2,5 kg
18	7,1	3,0	4,1	28,3	K810	21	n
19	11,6	1,0	10,6	72,2	K810	56	n
20	17,0	9,0	7,9	54,4	K810	59	n
21	17,3	1,0	16,3	111,5	K810	90	x 2,5 kg
22	13,7	7,7	6,0	40,9	K810	21	x n
23	12,9	1,0	11,9	81,4	K810	78	x 2,5 kg
24	12,9	1,0	11,9	81,4	K810	58	x 2,5 kg
25	12,9	1,0	11,9	81,4	K810	52	x n
26	13,0	1,0	12,0	82,1	K810	17	x n
27	14,2	7,6	6,6	45,1	K810	25	x n
28	17,1	1,0	16,1	110,2	K810	89	x n
29	17,5	9,3	8,2	56,3	K810	60	2,5 kg
30	12,0	1,0	11,0	75,4	K810	83	n
31	7,5	2,6	4,9	33,6	K810	38	n
32	5,7	1,5	4,2	28,8	K810	29	n
				1008,6			



Liite 7. 325L165_1 latvaräjäytyksen lastaus



Lastausvaiheessa huomattua reagoimatonta räjähdysainetta lohkaréen pinnalla.